

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до виконання лабораторних робіт та самостійної роботи  
з навчальної дисципліни

**«ІНЖЕНЕРНА ГІДРАВЛІКА»**

*(для студентів 2–3 курсів денної та заочної форм навчання  
спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія,  
спеціалізації (освітні програми) «Цивільна інженерія (Водопостачання та  
водовідведення)», «Гідротехніка (Водні ресурси)»)*

**Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2019**

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт та самостійної роботи з навчальної дисципліни «Інженерна гідравліка» (для студентів 2–3 курсів денної та заочної форм навчання спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, спеціалізації (освітні програми) «Цивільна інженерія (Водопостачання та водовідведення)», «Гідротехніка (Водні ресурси)») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : О. П. Галкіна. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2019. – 47 с.

Укладач      канд. техн. наук О. П. Галкіна

Рецензент доц., канд. техн. наук В. О. Ткачов

*Рекомендовано кафедрою водопостачання, водовідведення та очищення вод, протокол № 1 від 30 серпня 2018 р.*

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
1 ЛАБОРАТОРНІ ЗАНЯТТЯ.....	5
Лабораторна робота № 1 Визначення коефіцієнтів витрати, швидкості й опору при витіканні рідини через отвір при сталому напорі.....	5
Лабораторна робота № 2 Визначення витрати, швидкості, стиснення та опору при витіканні рідини через насадку при сталому напорі.....	13
Лабораторна робота № 3 Визначення гідравлічних параметрів усталеного потоку, що рухається у відкритому руслі.....	18
Лабораторна робота № 4 Визначення гідравлічних параметрів рівномірного потоку, що рухається у відкритому руслі.....	26
Лабораторна робота № 5 Вивчення форм та параметрів водозливів.....	31
Лабораторна робота № 6 Вивчення фільтраційних властивостей різних типів ґрунтів.....	36
2 САМОСТІЙНА РОБОТА.....	42
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	46

## ВСТУП

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт та самостійної роботи з навчальної дисципліни «Інженерна гідравліка» призначені для студентів 2–3 курсів денної та заочної форм навчання освітньо-професійних програм підготовки бакалавра за спеціальністю 192 – Будівництво та цивільна інженерія (освітньої програми «Цивільна інженерія» («Водопостачання та водовідведення»), «Гідротехніка (Водні ресурси)»). Головне завдання – набути навички застосування теоретичного матеріалу у вирішенні конкретних гідравлічних завдань та засвоїти методику гідравлічних розрахунків, зокрема у лабораторних умовах.

Під час вивчення дисципліни «Інженерна гідравліка» розглядаються головні закони руху та спокою рідини та їх застосування для вирішення конкретних питань інженерної справи. Тому виконання лабораторних робіт дає змогу краще освоїти матеріал. Методичні вказівки складено на основі обладнання лабораторії «Інженерної гідравліки та насосів» кафедри водопостачання, водовідведення та очищення вод Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова.

Лабораторні роботи складені відповідно до:

- загальні відомості з теми, яку ілюструю або підтверджує лабораторна робота;
- склад лабораторної роботи;
- опис лабораторної установки;
- порядок виконання роботи та обробка експериментальних даних;
- форма журналу, до якого записують результати вимірів;
- контрольні запитання.

Програмою дисципліни передбачено розрахунок трубопроводів різного призначення у відкритих руслах, гідравлічно найвигіднішого перерізу вивчення витікання рідини з отворів і насадок, вільних гідравлічних струменів, явища сполучення б'єфів, гідравлічного стрибку, руху ґрунтових вод, головним законом фільтрації. Для самостійного вивчення курсу кожна тема супроводжується питаннями для самоперевірки, які вивчають самостійно за допомогою літератури.

# 1 ЛАБОРАТОРНІ ЗАНЯТТЯ

## Лабораторна робота № 1

### *Визначення коефіцієнтів витрати, швидкості й опору при витіканні рідини через отвір при сталому напорі*

#### Загальні відомості

У гідротехніці та інших областях народного господарства часто вирішують питання, пов'язані з витіканням рідини з отворів.

Витікання рідини може відбуватися в атмосферу (не підтоплені отвори), або під рівень води (затоплені отвори) при сталому або змінному напорі.

У різних сферах техніки зустрічаються завдання, при яких рідина витікає через різні за формою та розмірами отворів.

Зважаючи на велике практичне завдання, витіканням рідини через отвір займались вчені: широко відомі експерименти учнів Галілея-Кастеллі й Торічеллі (1643 р.), які вивчали швидкість витікання рідини через отвір. Д. Бернуллі вирішував задачі про встановлення швидкості витікання рідини через отвір, вивів своє рівняння.

З того часу інженери й науковці виконали багато робіт щодо витікання рідини через отвір. Складність картини витікання через отвір пояснюється тим, що ще немає теорії витікання з отвору, а в розрахункові формули витікання рідини вводять експериментальні коефіцієнти.

При витіканні струменя з отвору на відстані від внутрішньої стінки резервуара, яка дорівнює приблизно  $0,5 d$  (де  $d$  – діаметр створу), утворюється «стислий переріз» (рис. 1.1). Площа стислого перерізу струменя  $\omega_c$  менше площі отвору  $\omega$ .

Стискання струменя характеризується коефіцієнтом стискання  $E$ , є відношення площі стислого перерізу  $\omega_c$  до площі отвору  $\omega$ :

$$E = \frac{\omega_c}{\omega}. \quad (1.1)$$

При витіканні струменя в атмосферу з малого отвору в тонкій стінці відбувається зміна форми струменя за довжиною (особливо це спостерігається при витіканні з квадратних, прямокутних і трикутних отворів). Таке явище називають інверсією струменя (рис. 1.2). Це явище виникає під дією сил поверхневого натягу на струмінь, що витікає.

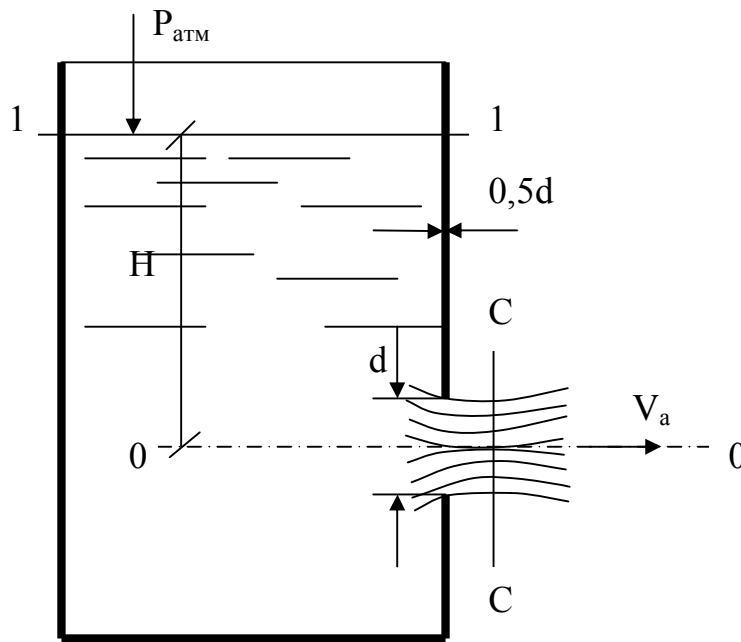


Рисунок 1.1 – Схема витікання струменя через тонку стінку

Якщо використати рівняння Бернуллі й написати його для двох перерізів, один з яких (1-1) співпадає з вільною поверхнею рідини в резервуарі, а другий (C-C) – зі стислим перерізом, за площину порівняння вибираємо площину (0-0), що проходить через центр ваги отвору (рис. 1.1), то при витіканні в атмосферу через малий отвір у тонкій стінці отримуємо розрахункові формули:

$$V = \varphi \sqrt{2gH} , \quad (1.2)$$

$$i \quad Q = \mu \omega \sqrt{2gH} , \quad (1.3)$$

де  $V$  – середня швидкість у сталому перерізі струменя;

$g$  – прискорення сили ваги;

$H$  – напір над центром ваги отвору;

$Q$  – витрата;

$\omega$  – площа отвору;

$\mu$  – коефіцієнт витрати, що дорівнює добутку коефіцієнта стискання та коефіцієнта швидкості:

$$\mu = \varepsilon \cdot \varphi , \quad (1.4)$$

$\varphi$  – коефіцієнт швидкості, що визначається за формулою:

$$\varphi = \frac{1}{\sqrt{1+\xi}} , \quad (1.5)$$

де  $\xi$  – коефіцієнт опору.

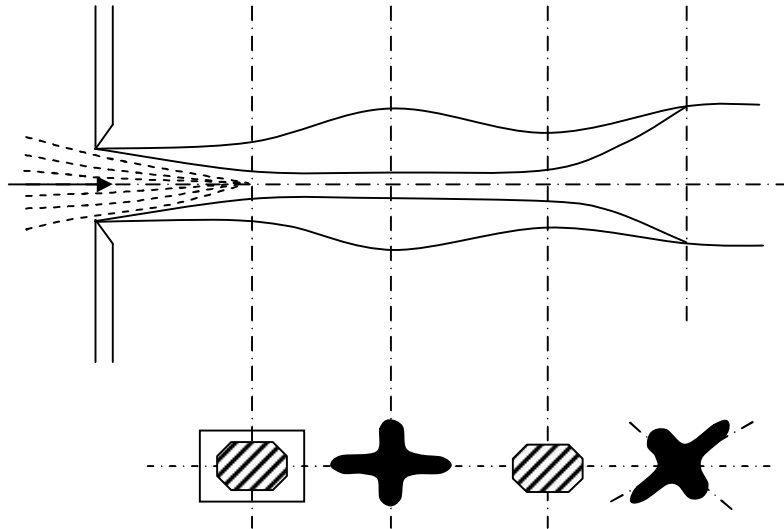


Рисунок 1.2 – Схема зміни форми поперечного перерізу струменя за довжиною

Фізичний зміст коефіцієнта витрати та його числове значення можна бути знайти за формулою:

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}} \quad (1.6)$$

або коефіцієнт витрати можна визначити як співвідношення дійсної витрати до теоретичної.

Аналогічно можна встановити фізичний зміст коефіцієнта швидкості:

$$\varphi = \frac{V}{\sqrt{2gH}}, \quad (1.7)$$

де  $\varphi$  – характеризує зменшення дійсної швидкості  $V$  витікання в'язкої рідини порівняно з теоретичною  $V_{теор}$  невіязкої рідини, яка визначається за формулою Торічеллі:

$$V_{теор} = \sqrt{2gH}. \quad (1.8)$$

Числове значення коефіцієнта швидкості можна визначити, враховуючи, що при витіканні рідини з отвору струмінь набуває форму параболи. Згідно з закону вільного падіння будемо мати:

$$x = V \cdot t, \quad (1.9)$$

$$y = \frac{gt^2}{2}. \quad (1.10)$$

де  $x$  і  $y$  – координати довільної точки струменя відносно початку координат, який співпадає з центром ваги стислого перерізу (рис. 1.1);

$t$  – час руху частини рідини від стислого перерізу до потрібного перерізу.

Виключаючи з рівнянь (1.9) і (1.10) час  $t$ , отримаємо:

$$V = \frac{x\sqrt{g}}{\sqrt{2y}}. \quad (1.11)$$

Підставляючи значення  $V$  із рівняння (1.11) у рівняння (1.7), маємо:

$$\varphi = \frac{x}{2\sqrt{Hy}}. \quad (1.12)$$

Визначивши у такий спосіб  $\varphi$ , можна з рівняння (1.5) знайти коефіцієнт опору  $\xi$ :

$$\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1. \quad (1.13)$$

На основі багатьох експериментів для круглих, квадратних отворів у тонкій стінці при абсолютному стисканні й при числах Рейнольдса  $> 10^5$  коефіцієнти витікання мають такі значення:

$$E = 0,63 \div 0,64; \quad \xi = 0,06; \quad \varphi = 0,97; \quad \mu = 0,62.$$

При  $Re < 10^5$  зростає нерівномірність розподілу швидкостей у початковому перерізі струменя та збільшуються втрати напору. Збільшення коефіцієнта кінетичної енергії  $\alpha$  і коефіцієнта опору  $\xi$  призводить до зменшення коефіцієнта швидкості  $\varphi$ .

Експерименти підтвердили, що при  $Re > 10^5$  значення  $Re$  на коефіцієнт витікання не впливають (квадратична зона опору).

### Склад роботи

1. Визначити експериментальним шляхом коефіцієнти витрати, швидкості, стискання та опору при витіканні з отвору в тонкій стінці й порівняти ці коефіцієнти з довідковими.

2. Спостереження явища інверсії струменя, що витікає з отворів різної форми.

### Опис експериментальної установки

Експериментальна установка (рис. 1.3) складається з напірного резервуара (6). Надходження води в напірний резервуар регулюється за



допомогою вентиля (3). Для підтримки сталого напору резервуар обладнаний переливним пристроєм. До напірного резервуара приєднаний патрубок, на який встановлюють отвори (7) різної форми й типів. Вода з отвору 7 витікає у вимірний резервуар (6).

Для вимірювання координат осі струменя, що витікає з отвору, застосовують спеціальний пристрій (координатник), що складається з горизонтальної рейки зі шкалою (4) і мірною голкою (5), яка вільно пересувається по горизонтальній рейці. Нуль шкали горизонтальної рейки співпадає зі стислим перерізом струменя. Напір, при якому відбувається витікання, фіксується п'єзометром (8).

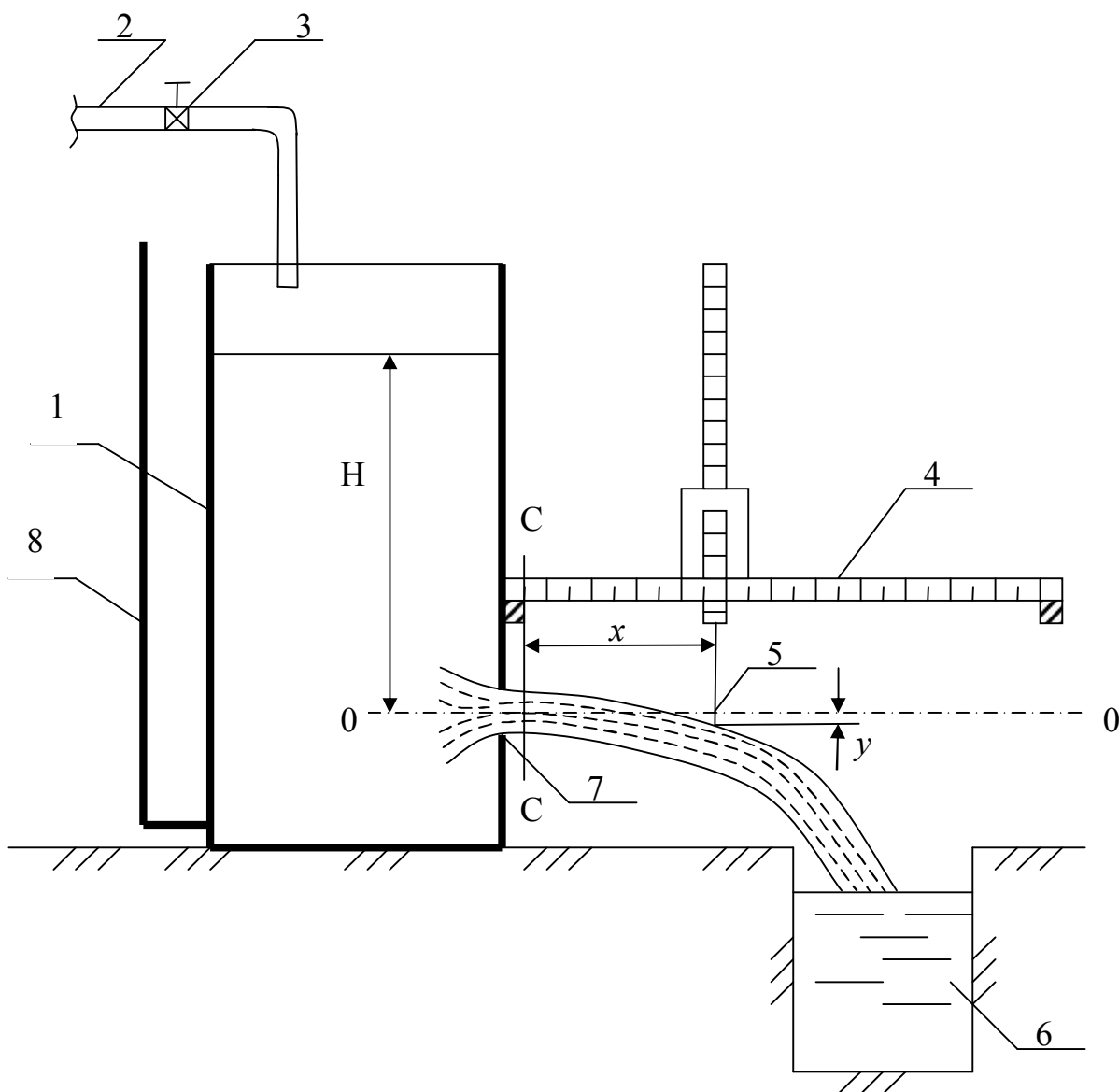


Рисунок 1.3 – Схема експериментальної установки

### Порядок проведення роботи

1. Вимірюємо діаметр  $d$ , а для некруглих отворів – розміри поперечного перерізу та приєднуємо отвір до торцевої стінки патрубку.

2. Відкриваємо кран (3) на трубі (2) і наповнюємо водою напірний резервуар (1). На весь час проведення експерименту перелив повинен працювати, тобто напір  $H$  має бути сталим і фіксуватися п'єзометром (8).

3. Визначаємо об'єм води  $W$ , за часом  $T$ , що фіксується секундоміром.

4. За допомогою штангенциркуля або спеціального пристрою вимірюємо розміри поперечного перерізу струменя в стислому перерізі за горизонталлю  $b$  і за вертикаллю  $a$ .

5. За допомогою координатника (4) і вимірної голки (9) знаходимо координати  $x$  і  $y$ , якої-небудь точки осі струменя, що витікає з отвору.

6. Змінюючи почергово отвори, спостерігаємо явище інверсії струменя при витіканні з отвору різної форми.

### Обробка експериментальних даних

1. Визначення площини перерізу отвору:

а) круглого  $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ ; (1.14)

б) не круглого  $\omega = a \cdot b$ , (1.15)

де  $b$  – ширина прямокутного отвору;  
 $a$  – висота прямокутного отвору.

2. За виконаними замірами обчислюємо площу струменя в стислому перерізі за формулою:

$$\omega_c = \frac{\pi ab}{4}. \quad (1.16)$$

3. Знаходимо коефіцієнт стиснення струменя за формулою (1.1).

4. За отриманими замірами обчислюємо витрату:

$$Q = \frac{W}{T}. \quad (1.17)$$

5. За формулою (1.6) обчислюємо коефіцієнт витрати отвору  $\mu$ :

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}.$$

6. Визначаємо коефіцієнт швидкості рідини з отвору зі співвідношенням (1.4) як:

$$\varphi = \frac{\mu}{E} \quad (1.18)$$

і за рівнянням (1.12), співставляємо їх.

7. Обчислюємо коефіцієнт опору отвору  $\xi$  за формулою (1.13).

8. За рівнянням (1.2) знаходимо дійсну середню швидкість у стиснутому перерізі, а за рівнянням (1.8) – швидкість без урахування опору – теоретичну швидкість у цьому самому перерізі.

9. За співвідношенням швидкостей за формулою (1.7) знову обчислюємо коефіцієнт швидкості  $\varphi$  і співставляємо його значення з коефіцієнтом швидкості, який знаходимо за формулами (1.18) та (1.12).

10. Обчислюємо експериментальним шляхом коефіцієнти  $\mu$ ,  $\varphi$ ,  $E$  та  $\xi$  і співставляємо їх із довідковими. Результати зводимо до табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Журнал лабораторної роботи № 1

№ з/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик
1	2	3
1	Діаметр круглого отвору $d$ , мм	
2	Площа перерізу круглого отвору $\omega = \frac{\pi \cdot d^2}{4}$ , см <sup>2</sup>	
3	Розміри прямокутного (квадратного) отвору: – висота отвору $a$ , мм – ширина отвору $b$ , мм	
4	Площа перерізу прямокутного (квадратного) отвору $\omega = a \cdot b$ , см <sup>2</sup>	
5	Напір, під яким відбувається витікання $H_0$ , м	
6	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час $W$ , л	
7	Тривалість витікання $T$ , с	
8	Розміри струменя у стислом перерізі при витіканні з отвору: – за вертикаллю $a$ , мм – за горизонталлю $b$ , мм	
9	Площа струменя в стислом перерізі отвору $\omega_c = \frac{\pi ab}{4}$ , см <sup>2</sup>	
10	Коефіцієнт стиснення струменя, що витікає з отвору $E = \frac{\omega_c}{\omega}$	
11	Витрата $Q = \frac{W}{T}$ , см <sup>3</sup> /с	

Продовження таблиці 1.1

1	2	3
12	Коефіцієнт витрати з отвору $\mu = \frac{Q}{\omega\sqrt{2gH}}$	
13	Координати точки на осі струменя, що витікає з отвору: – абсциса – $x$ , см – ордината – $y$ , см	
14	Коефіцієнт швидкості отвору: – зі співвідношення $\varphi = \frac{\mu}{E}$ – із рівняння $\varphi = \frac{x}{2\sqrt{Hy}}$	
15	Швидкість у стислому перерізі отвору з урахуванням опору $V = \varphi\sqrt{2gH}$ , см/с	
16	Швидкість у стислому перерізі отвору без урахування опору (теоретична) $V_{теор} = \sqrt{2gH}$ , см/с	
17	Коефіцієнт швидкості отвору за співвідношенням швидкостей $\varphi = \frac{V}{V_{теор}}$	
18	Коефіцієнт опору $\xi = \frac{1}{\varphi^2} - 1$	
19	Висновки:	

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)**Контрольні запитання**

1. Який гідравлічний зміст має назва «тонка стінка»?
2. Який отвір називають малим?
3. У яких умовах отвір буде перебувати в умовах неповного стиснення, не зовсім стиснутого, зовсім стиснутого?
4. Які числові значення мають коефіцієнти  $\mu$ ,  $\varphi$ ,  $E$  і  $\xi$  при витіканні з отвору в тонкій стінці?
5. Який фізичний зміст коефіцієнтів  $\mu$  і  $\varphi$ ?
6. Що таке коефіцієнт стиснення струменя?
7. Який зв'язок існує між коефіцієнтом швидкості й коефіцієнтом опору?
8. Як визначається коефіцієнт витрати через коефіцієнти  $E$  та  $\varphi$ ?
9. Напишіть формулу пропускну здатності отвору.

## Лабораторна робота № 2

### *Визначення коефіцієнта витрати, швидкості, стиснення й опору при витіканні рідини через насадку при сталому напорі*

#### Загальні відомості

Насадкою називається коротка труба завдовжки від  $3d$  до  $8d$  ( $d$  – внутрішній діаметр насадки). Насадки поділять на три типи: циліндричні, конічні й коноїдальні (рис. 2.1).

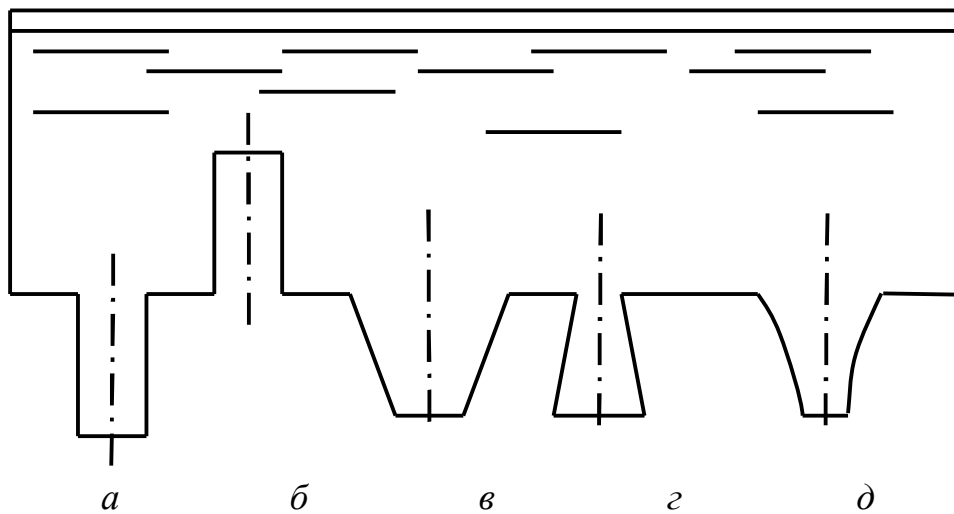


Рисунок 2.1 – Типи насадок

У інженерній практиці зустрічаються різні типи насадок: зовнішня циліндрична насадка, або насадка Вентурі (рис. 2.1, а), яка становить пряму циліндричну трубку довжиною  $(3,5-7)d$ , приставлену із зовнішнього боку стінки без закруглення вхідної кромки.

Внутрішня циліндрична насадка, або насадка Борда (рис. 2.1, б). Якщо до отвору з середини резервуара підключити коротку трубку довжиною не менше  $(3,5-4)d$ , то така насадка теж збільшує пропускну здатність. За даними дослідів, для внутрішньої циліндричної насадки  $\varphi = \mu = 0,71$ .

Конічно-збіжна насадка (конфузорна насадка) (рис. 2.1, в). У таких насадках рідина при виході також стискається, але менше.

Коефіцієнти  $\varphi$  і  $\mu$  цих насадок залежать від кута конусного  $\theta$ . Найвигіднішим кутом є кут  $\theta = 13^\circ 24'$ , при якому  $\varphi = 0,97$ ,  $\mu = 0,95$ ,  $E = 0,98$ .

Конічно-розхідні насадки (дифузорні насадки) (рис. 2.1, г). У насадках цього типу в зоні стиснення струменя виникає значно більше розрідження, ніж у циліндричних насадках, що сприяє збільшенню швидкості в стиснутому перерізі внаслідок підсмоктування. Найвигіднішим вважається кут  $\theta = 8^\circ$ . Коефіцієнти  $\varphi$  і  $\mu$  змінюються в межах  $0,45-0,5$ , що свідчить про порівняно невеликі швидкості на виході.

Коноїдальні насадки (рис. 2.1, д). При таких насадках завдяки плавним умовам входу в насадку зменшують втрати енергії при виході, що сприяє збільшенню пропускної здатності насадок.

Дослідами підтверджено, що  $\varphi = \mu = 0,96-0,99$ .

При витіканні рідини через будь-які насадки, як і при витіканні через отвір, у разі використання рівняння Д. Бернуллі для перерізів 1-1 і 2-2 (рис. 2.2) можна одержати розрахункові формули швидкості й витрати, які так само, як і при витіканні з отвору застосовуємо формули (1.2) та (1.3), де  $V = \varphi\sqrt{2gH}$  і  $Q = \mu\omega\sqrt{2gH}$ .

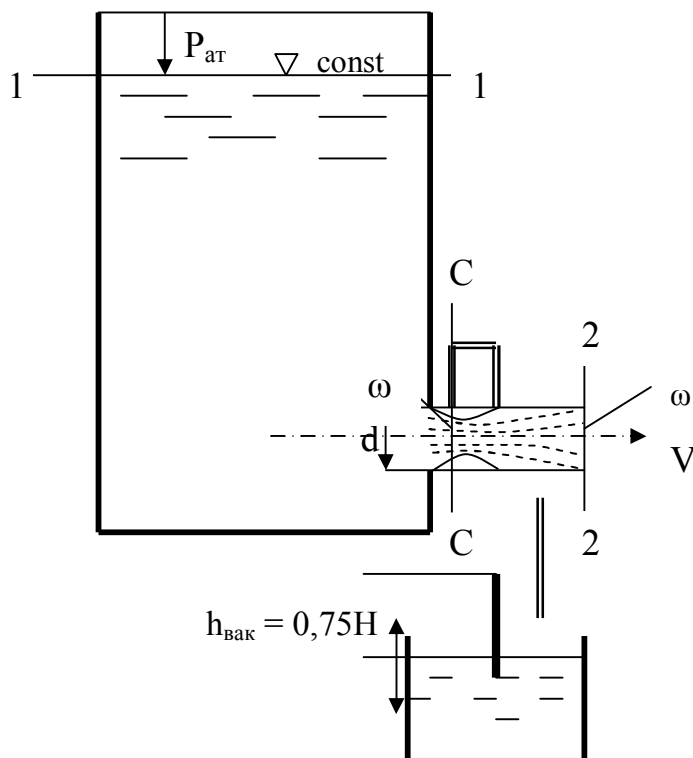


Рисунок 2.2 – Схема витікання рідини через насадку

Якщо насадка визначається для вихідного отвору, коли  $E = 1$ , то за формулою (2.4) коефіцієнт витрати насадка дорівнює коефіцієнту швидкості:

$$\mu = E \cdot \varphi = 1 \cdot \varphi = \varphi. \quad (2.1)$$

Якщо в перерізі С-С швидкість більша, ніж на вихідному перерізі насадки ( $V_c > V$ ), то за рівнянням Д. Бернуллі тиск у стислому перерізі буде менший від атмосферного ( $P < P_{атм}$ ), тобто в стиснутому перерізі утворюється вакуум. Якщо до насадки в стиснутому перерізі підключити вакуум, то висота піднятої рідини  $h_{вак} = 0,75H$  (рис. 2.2).

Утворення вакууму сприяє додатковому підсмоктуванню рідини з напірного резервуара. Пропускна здатність насадки (витрата) перевищує пропускну здатність отвору того самого розміру при однаковому напорі.

Якщо трубка вакуумметра буде коротшою, ніж  $h_{\text{вак}}$ , то насадок почне «підсмоктувати» рідину з вакуумметра. На цьому явищі заснована дія водоструминних насосів.

При напорах, більших за граничні (для води  $H_{\text{гран}} \approx 13$  м), у циліндричних насадках відбувається зрив вакууму. При цьому струмінь відривається від внутрішньої поверхні насадки й витікання проходить із малого отвору в тонкій стінці. У такому разі насадка не виправдовує свого значення. На практиці приймають вакуумметричну висоту не більшу ніж 8 м, тоді  $H_{\text{гран}} \leq 10,7$  м.

### Склад роботи

1. Визначення експериментальним шляхом коефіцієнтів витрати, швидкості, стиснення та опору при витіканні рідини через насадку та порівняння цих коефіцієнтів з довідковими.
2. Вимірювання величини вакууму в зовнішньому циліндричному насадку, спостереження за зривом вакууму.

### Опис експериментальної установки

Дослідна установка (рис. 2.3) складається з напірного резервуара (7) і вимірного резервуара (4). Надходження води у напірний резервуар регулюється за допомогою крана (2). Для дотримання сталого напору резервуар обладнано переливними пристроями. До резервуару приєднана циліндрична насадка у торцевій стінці. Вода з насадки (3) витікає у вимірний резервуар (4). Вакуум насадка вимірюється за допомогою вакуумметра. Напір, при якому здійснюється витікання рідини з насадки, фіксується за допомогою п'єзометра (6).

### Порядок виконання роботи

1. Вимірюємо діаметри вхідного  $d_1$  і вихідного  $d_2$  отворів насадок.
2. Шляхом відкривання крану (2) на трубі (1) наповнюємо напірний резервуар (7). На весь час проведення дослідів перелив повинен працювати, тобто напір  $H$  має бути сталим.
3. Визначаємо об'єм води  $W$  за певний час  $T$ , що фіксується секундоміром.
4. Напір  $H$ , при якому проходить витікання, визначаємо за п'єзометром (6), нуль якого співпадає з віссю насадки.
5. За допомогою вакуумметра вимірюємо вакуум.
6. Для спостереження явища «зриву вакууму» знімають гумову трубку зі штуцера насадки (1) у такий спосіб з'єднують зону пониженого тиску з атмосферою, що призводить до зриву вакууму. Для відновлення вакууму надівають гумову трубку на штуцер і на деякий час перекривають вихідний отвір насадки.

Під час проведення дослідів варто звертати увагу на форму, характер, дальність струменя, який витікає з насадки, а також при зриві вакууму.

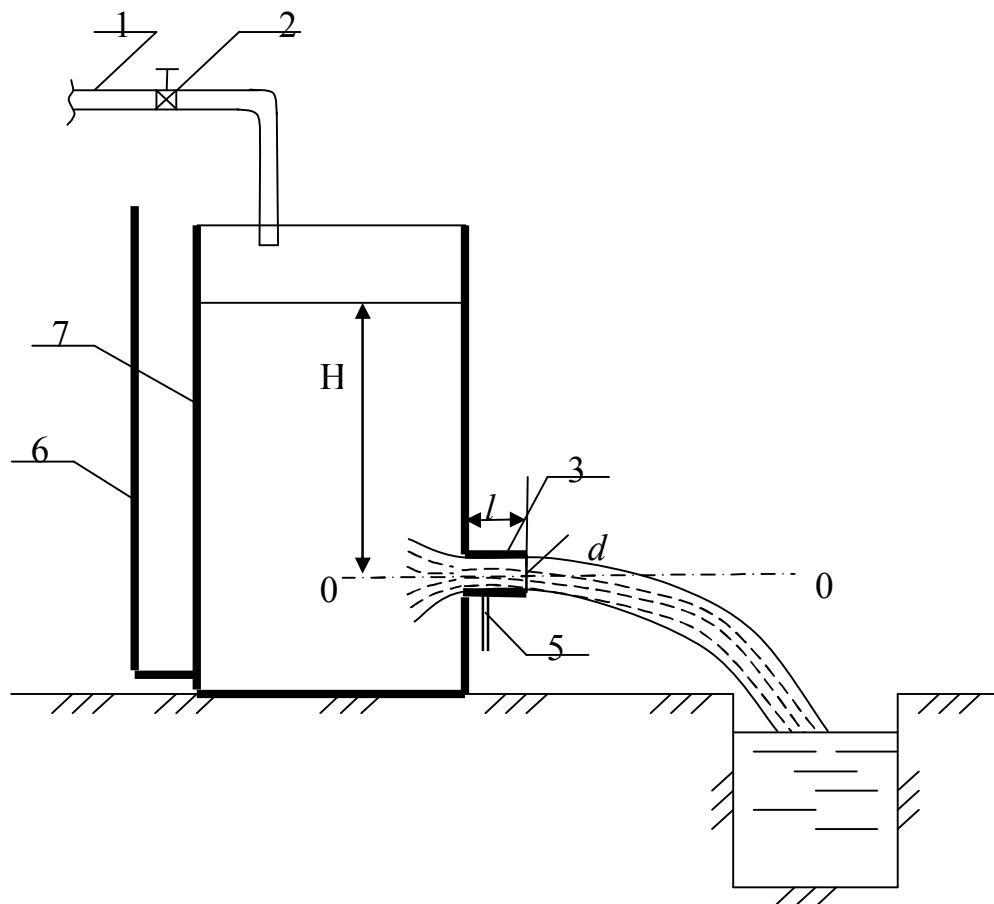


Рисунок 2.3 – Схема експериментальної установки

### Обчислення дослідних даних

1. Визначаємо площину перерізу насадки на вході  $\omega_1$  та на виході  $\omega_2$ :

$$\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \text{ і } \omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}, \quad (2.2)$$

де  $d_1$  – діаметр насадки на вході;  
 $d_2$  – діаметр насадки на виході.

2. За даними вимірів обчислюємо витрату насадка за формулою:

$$Q = \frac{W}{T}. \quad (2.3)$$

3. За рівнянням знаходимо коефіцієнт витрати насадки:

$$\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}. \quad (2.4)$$

4. Визначаємо відношення  $h_{\text{вак}} / H$  і обчислюємо величину вакууму на вході в насадку:

$$P_{\text{вак}} = \rho g h_{\text{вак}}. \quad (2.5)$$

5. Отримані з дослідів значення  $\varphi$ ,  $\mu$ ,  $\zeta$  та  $h_{\text{вак}} / H$  зіставляємо з довідковими. Усі результати вимірювань і обчислення записуємо до лабораторного журналу (табл. 2.1).



Таблиця 2.1 – Журнал лабораторної роботи № 2

№ з/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення характеристик
1	2	3
1	Довжина насадки $l$ , см	
2	Діаметр насадки: – на вході $d_1$ , мм – на виході $d_2$ , мм	
3	Площа перерізу насадки: – на вході $\omega_1 = \frac{\pi \cdot d_1^2}{4}$ , см <sup>2</sup> – на виході $\omega_2 = \frac{\pi \cdot d_2^2}{4}$ , см <sup>2</sup>	
4	Напір, під яким відбувається витікання $H_0$ , м	
5	Об'єм води, що надходить до мірного резервуару за певний час $W$ , л	
6	Тривалість витікання $T$ , с	
7	Витрата $Q = \frac{W}{T}$ , см <sup>3</sup> /с	
8	Коефіцієнт витрати насадки $\mu = \frac{Q}{\omega \sqrt{2gH}}$	
9	Середня швидкість у швидкісному перерізі насадки $V = \frac{Q}{\omega_2}$ , см/с	
10	Коефіцієнт швидкості насадки $\mu = \frac{V}{\sqrt{2gH}}$	
11	Значення вакууму на вході в насадку $h_{\text{вак}}$ , см	
12	Відношення $h_{\text{вак}} / H$	
13	Вакуумметричний тиск на вході в насадку $P_{\text{вак}} = \rho g h_{\text{вак}}$	

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)**Контрольні запитання**

1. У яких умовах струмінь буде перебувати в умовах неповного стиснення, не зовсім стиснутого, зовсім стиснутого при витіканні з насадки?
2. Які числові значення мають коефіцієнти  $\mu$ ,  $\varphi$ ,  $E$  і  $\xi$  при витіканні з насадок різної форми? Який фізичний зміст коефіцієнтів  $\mu$  та  $\varphi$ ?
3. Що таке коефіцієнт стиснення струменя?
4. Як визначають коефіцієнт витрати через коефіцієнти  $E$  та  $\varphi$  при витіканні рідини через насадки?

## Лабораторна робота № 3

### *Визначення гідравлічних параметрів усталеного потоку, що рухається у відкритому руслі*

#### Загальні відомості

Зазвичай у штучних відкритих руслах спостерігається нерівномірний рух. Будь-яка перешкода, побудована в руслі (гребля, міст тощо), зміна ухилу дна, будь-які нерівності дна тощо порушують рівномірний рух і обумовлюють перехід його у нерівномірний. У призматичних руслах з ухилами дна  $i \leq 0$  і в непризматичних руслах рівномірний рух фізично неможливий.

При нерівномірному русі за довжиною потоку спостерігається або зміна середньої швидкості течії, або перерозподіл швидкостей за живим перерізом, що зумовлює появу сил інерції та порушує рівновагу сил, що діють на потік, властивий рівномірному руху. Глибина потоку  $h$  при нерівномірному русі зазвичай змінюється за шляхом.

Основне диференціальне рівняння усталеного нерівномірного плавно-змінного руху рідини в призматичному руслі будь-якої правильної форми виглядає так:

$$\frac{dh}{dl} = \frac{i - \frac{Q^2}{K^2}}{1 - \frac{\alpha Q^2 B}{g \omega^3}}, \quad (3.1)$$

де  $dh$  – нескінченно мала зміна глибини потоку на нескінченно малому шляху його  $dl$ ;

$i$  – ухил дна русла;

$Q$  – витрата рідини;

$K = \omega C \sqrt{R}$  – витратна характеристика у конкретному перерізі потоку з глибиною  $h$ .

У роботі проводиться оцінка енергетичного стану потоку у відкритому руслі та побудова кривих вільної поверхні.

На основі аналізу рівняння (3.1) досліджуються криві вільної поверхні потоку, а його інтегрування дає можливість розраховувати й будувати криві вільної поверхні в призматичних руслах будь-якої правильної форми.

Для оцінки енергетичного стану потоку та дослідженні кривих вільної поверхні в призматичних руслах використовуються поняття нормальної та критичної глибин, а також критичного ухилу дна русла.

Нормальною глибиною  $h_0$  називається глибина наповнення призматичного русла з прямим ухилом дна, при якій проходження витрати здійснюється при рівномірному русі. Під час розгляду нерівномірного руху під нормальною глибиною розуміється уявна глибина наповнення, яка встановилася б у руслі, якщо рух став рівномірним.

Нормальну глибину визначають за формулою Шезі (3.2). Нормальна глибина  $h_0$  залежить від ухилу дна  $i$  та коефіцієнта шорсткості  $n$  русла:

$$V = C\sqrt{Ri}. \quad (3.2)$$

Критична глибина  $h_K$  – глибина, що відповідає мінімальними значенням питомої енергії перерізу  $E$ . Питома енергія потоку становить повну питому енергію у даному перетині безнапірного потоку відносно площини порівняння, що проходить через найнижчу точку живого перетину:

$$E = h + \frac{\alpha V^2}{2g} = h + \frac{\alpha Q^2}{2g\omega^2} = E_{\text{пот}} + E_{\text{кін}}. \quad (3.3)$$

Критична глибина  $h_K$  для призматичного русла будь-якої правильної форми визначається з основного рівняння критичного стану потоку:

$$\frac{\alpha V^2}{g} = \frac{\omega_K^3}{B_K}, \quad (3.4)$$

де  $\omega_K$  і  $B_K$  – площа живого перетину й ширина потоку поверху, що відповідають критичній глибині.

Згідно з рівнянням (3.1) видно, що критична глибина залежить від витрати й форми русла, але (на відміну від нормальної) не залежить ні від ухилу дна русла, ні від його шорсткості.

У разі прямокутного русла критична глибина визначається за формулою, отриманої з рівняння (3.3):

$$h_K = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{gB^2}} = \sqrt[3]{\frac{\alpha q^2}{g}}, \quad (3.5)$$

де  $q = Q/B$  – питома витрата води (витрата, що припадає на одиницю ширини русла).

При заданій витраті в призматичному руслі, для якого  $\omega = f(h)$ , питома енергія перерізу є функцією тільки глибини потоку, тобто  $E = f(h)$ .

Графік цієї функції (рис. 3.1) показує, що одному й тому самому значенню  $E$  можуть відповідати два різних значення глибини потоку  $h$ , одне з яких більше критичної глибини, а інше – менше.

Якщо глибина потоку перевищує критичну ( $h > h_K$ ), потік перебуває в спокійному стані. У цьому разі кінетична енергія потоку мала, порівняно з потенційною, тому параметр кінетичності  $\Pi_K$  (число Фруда  $Fr_h$ , обчислене через середню глибину  $h = \omega/B$ ) менше одиниці, тобто:

$$\Pi_K = \frac{\alpha Q^2 B}{g\omega^2} = \frac{\alpha V^2}{gh} < 1. \quad (3.6)$$

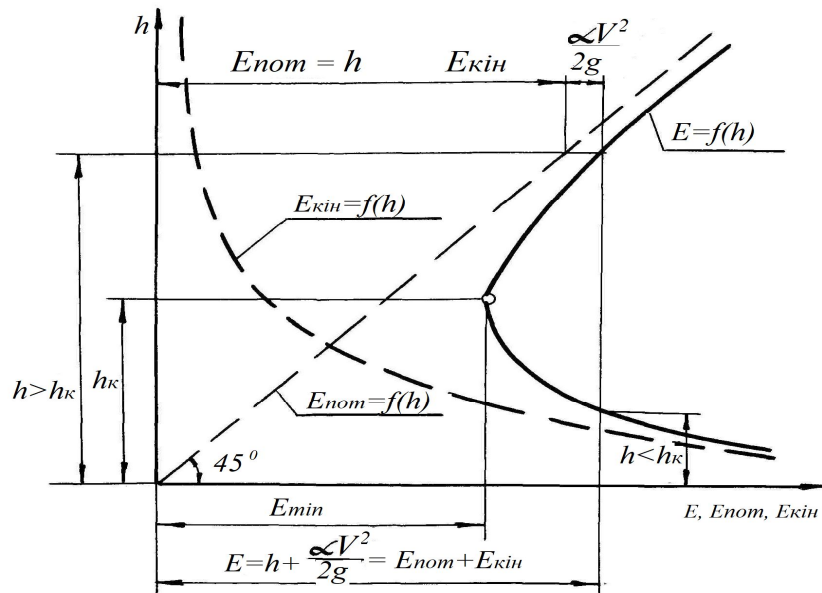


Рисунок 3.1 – Графік питомої енергії перерізу

Для прямокутного русла вираз (3.7) має вигляд:

$$P_k = \left( \frac{h_k}{h} \right)^3. \quad (3.7)$$

При спокійному стані потоку питома енергія перерізу зі збільшенням глибини потоку зростає.

1. Якщо глибина потоку менше критичної ( $h < h_k$ ), потік перебуває у бурхливому стані ( $P_k > 1$ ), а питома енергія перерізу з ростом глибини потоку зменшується.

2. Якщо  $h = h_k$ , потік знаходиться у критичному стані ( $P_k = 1$ ), а питома енергія перерізу  $E$  приймає мінімальне значення.

Таким чином, використовуючи поняття критичної глибини, можна класифікувати потоки за їхнім енергетичним станом.

Критичний ухил  $i_k$  – це такий ухил dna призматичного русла, при якому задана витрата пропускається за нормальною глибиною рівній критичній ( $h_o = h_k$ ), а величина критичного ухилу знаходиться з формули Шезі:

$$i_k = \frac{Q^2}{\omega_k C_k^2 R_k}. \quad (3.8)$$

Критичний ухил може бути обчислений для будь-якого призматичного русла, незалежно від того, чи має це русло ухил dna  $i < 0$  чи  $i > 0$ .

Якщо  $i < i_k$ , нормальна глибина більше критичної ( $h_o > h_k$ ).

Якщо  $i > i_k$ , то  $h_o > h_k$ . При  $i = i_k$   $h_o = h_k$ .

Під час дослідження кривої вільної поверхні доцільно нанести на креслення профілю русла лінії нормальної глибини та критичної. Ці лінії залежно від ухилу dna русла можуть займати різне положення відносно один одного:

- при  $i < i_k$  лінія нормальної глибини розміщена вище критичної лінії ( $h_o > h_k$ ) коли  $h > h_o > h_k$  (рис. 3.2);
- при  $i > i_k$  лінія нормальної глибини розташована нижче критичної лінії (рис.3.3);
- при  $i = i_k$  лінії зливаються в одну.

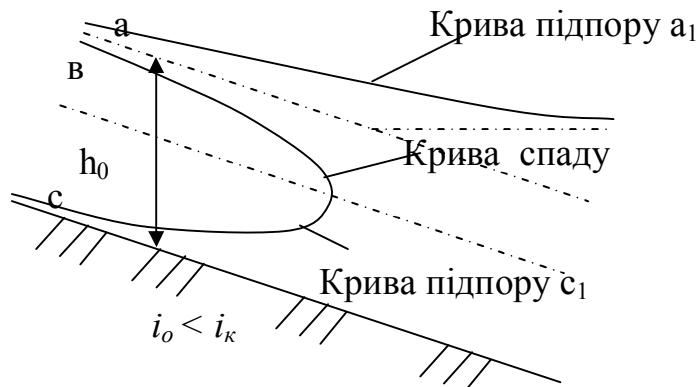


Рисунок 3.2 – Призматичне русло при прямому ухилі дна при  $i < i_k$

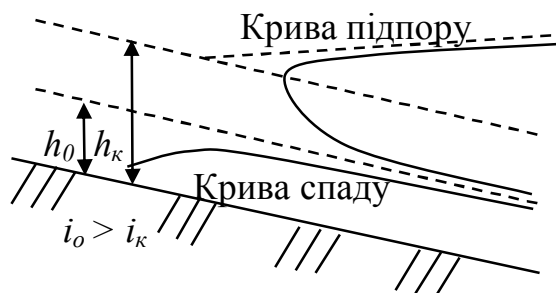


Рисунок 3.3 – Форма вільної поверхні при  $h > h_k > h_o$

У руслах із горизонтальним дном ( $i = 0$ ) і зі зворотним ухилом дна ( $i < 0$ ) рівняння рівномірного руху втрачає фізичний зміст, адже не має фізичного сенсу й поняття про нормальну глибину. Критична ж глибина і в цих випадках зберігає своє значення, адже не залежить від ухилу дна. Тому при ухилі дна  $i \leq 0$  має тільки критичну лінію.

Дослідження кривої вільної поверхні потоку виконують у такій послідовності:

1. Встановлюють енергетичний стан потоку (за співвідношенням між глибинами  $h$  і  $h_k$ ); якщо  $h > h_k$  – потік в спокійному стані,  $h < h_k$  – у бурхливому.

2. З'ясовують яку форму буде мати крива вільної поверхні (криву спаду або криву підпору). Для цього необхідно через співвідношення між глибинами  $h$ ,  $h_o$  і  $h_k$  або між  $h$  і  $h_k$ , визначити знак похідної  $dh / dl$  у рівнянні (3.1):

- якщо  $dh / dl > 0$ , має знак «плюс» – крива вільної поверхні є кривою підпору,
- а в іншому випадку – кривою спаду.

3. Визначають за графіком  $E = f(h)$  зменшується чи зростає питома енергія перерізу  $E$  за шляхом руху потоку.

4. Установлюють форму (кривизну) кривої вільної поверхні, з'ясовуючи, до чого схильна  $dh/dl$  у рівнянні (3.1) при значеннях  $h$  до крайніх значень.

5. Визначають форму довжини кривої вільної поверхні: кінцева або нескінченна (за наявності асимптот). Якщо крива має хоча б одну асимптоту – її довжина теоретично дорівнює нескінченності.

### Склад роботи

1. З'ясувати енергетичний стан потоку та побудувати за дослідними даними криві вільної поверхні.

2. Установити тип і форму кривих вільної поверхні потоку за даними вимірювання глибин.

3. Перевірити відповідність форм кривих вільної поверхні (знайдених дослідним шляхом) із теоретичними за рівнянням (3.1).

### Опис експериментальної установки

Установка (рис. 3.4) становить скляний лоток (8) прямокутного перетину зі змінним ухилом дна, напірний бак (11), обладнаний п'єзометром (12), і нижнім металевим лотком (4). Циркуляція води в установці забезпечується насосом (2) з електродвигуном (1). Витрата води регулюється засувкою (3).

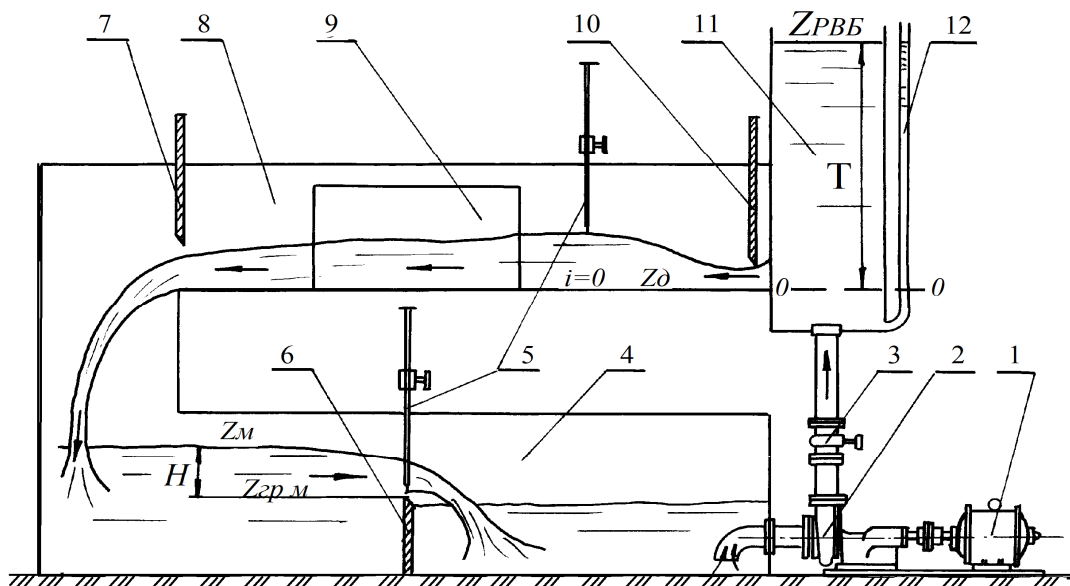


Рисунок 3.4 – Схема установки

Створення потоку з різними формами кривих вільної поверхні здійснюється шляхом маневрування засувкою (3) і плоскими затворами (7) і (10). Для вимірювання витрати використовується трикутний водозлив 6. Глибини потоку визначаються мірною голкою (5) і (9). Знаходження перетинів потоку визначається за шкалою, розташованою на стінці лотка (8) (на схемі не зображена).

## Порядок проведення роботи

1. При ухилі дна лотка (8) ( $i = 0$ ) включити насос (2), відкрити повністю засувку (3) і затвори (7) і (10). Потім виміряти статичний тиск  $H$  на водозливі (6) і обчислити витрату.
2. Для знайденої витрати  $Q$  і відомої ширини лотка  $B$  розрахувати за формулою (3.5) критичну глибину  $h_k$  і критичний ухил  $i_k$  за формулою (3.8).
3. Відзначити на стінці лотка (8) положення лінії критичної глибини, орієнтуючись на неї, відрегулювати відкриття затворів (7) і (10) так, щоб глибини потоку в лотку були менше критичної. Потім виміряти глибини потоку у перетинах і їх координати  $x$  (за шкалою на стінці лотка).
4. Маневруючи затворами (7) і (10), створити в лотку потік з глибинами  $h$  більше критичної глибини  $h_k$ , зробити виміри глибин і відстаней.
5. Не змінюючи витрати, створити прямий ухил дна русла ( $i > 0$ ). Обчислити для ухилу дна нормальну глибину  $h_0$ . При цьому глибини потоку  $h$  повинні бути більше нормальної  $h_0$  та менше нормальної (в обох більше критичної  $h_0 > h > h_k$ ).
6. Результати вимірювань занести до журналу та зробити висновок шляхом вичислення.

## Обробка експериментальних даних

1. Визначаємо критичну глибину потоку: 
$$h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g B^2}}.$$
2. Визначаємо критичний ухил за формулою: 
$$i_k = \frac{Q^2}{\omega_k^2 C_k^2 R_k}.$$
3. Визначаємо ухил дна лотка: 
$$i = \frac{Z_{\partial 1} - Z_{\partial 2}}{L_{1-2}}.$$

Отримані експериментальні дані занести до табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Журнал лабораторної роботи № 3

№ з/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення		
		Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3
1	Мірний трикутний водозлив (водозлив Томсона) відмітка гребня $Z_{г.м}$ , м відмітка рівня води $Z_m$ , м Напір $H = Z_m + Z_{г.м}$ , м Витрата води $Q = 1,4H^{5/2}$ м <sup>3</sup> /с			
2	Ширина лотка, $B$ , см			
3	Критична глибина $h_k = \sqrt[3]{\frac{\alpha Q^2}{g B^2}}$ , см			

Продовження таблиці 3.1

4	Критичний ухил $i_k = \frac{Q^2}{\omega_k^2 C_k^2 R_k}$			
5	Нормальна глибина (за формулою Шезі), $h_0$ , см			
6	Глибина потоку у довільному перерізі $h$ , см			
7	Співвідношення між глибинами $h$ , $h_0$ і $h_k$ ( $h_0 < h > h_k$ ; $h_k > h < h_0$ тощо)			
8	Енергетичний стан потоку (спокійний, бурний, критичний)			
9	Ухил дна лотка $i = \frac{Z_{\partial 1} - Z_{\partial 2}}{L_{1-2}}$			
10	Глибини потоку $h$ у перерізі (у чисельнику) і координат $x$ перетинів (у знаменнику)  $h_1/x_1$ , см $h_2/x_2$ , см $h_3/x_3$ , см $h_4/x_4$ , см $h_5/x_5$ , см $h_6/x_6$ , см			
11	Висновок:			

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

\_\_\_\_\_ (підпис студента)

### Контрольні запитання

1. Поясніть поняття кривої вільної поверхні, кривої спаду та кривої підпору.
2. Наведіть класифікацію відкритих русел за ухилом дна та формою поперечного перерізу.
3. Як визначають енергетичний стан потоку?
4. Що таке нормальна, критична глибини та критичний ухил дна русла?
5. Зобразіть графік питомої енергії перерізу. Що відбувається з питомою енергією перерізу при зростанні глибини потоку за шляхом руху рідини при спокійному й бурхливому станах потоку?
6. Поясніть, як визначається нормальна глибина потоку  $h_0$ ?
7. Напишіть рівняння критичного стану. Як визначають критичну глибину?
8. Як визначається критичний ухил  $i_k$  дна русла?
10. Напишіть основне диференціальне рівняння усталеного нерівномірного руху води в призматичному руслі.



## Лабораторна робота № 4

### Визначення гідравлічних параметрів рівномірного потоку, що рухається у відкритому руслі

#### Загальні відомості

Рівномірний рух у відкритих руслах зустрічається тільки в штучних водотоках – каналах і лотках. Рух у річках – нерівномірний, оскільки гідравлічні елементи потоку в природних руслах змінюються вздовж водотоку.

Рівномірний рух води – рух, при якому витрата й розміри живого перетину потоку незмінні по його довжині (рис. 4.1). Отже, для існування рівномірного руху необхідно виконання кількох умов.

$$I_p = i = I, \quad (19.1)$$

де  $I_p$  – п'єзометричний ухил;

$I$  – ухил вільної поверхні потоку;

$i$  – гідравлічний ухил дна русла.

Ця умова виконується при постійних: витраті  $Q$ , площі живого перетину, шорсткості  $n$  змоченої поверхні русла по довжині, та за відсутності місцевих опорів.

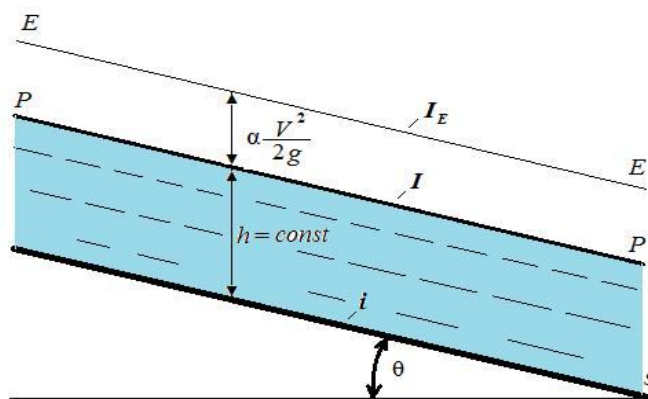


Рисунок 4.1 – Рівномірний рух рідини у відкритому призматичному руслі:

$$h = \text{const}; V = \text{const}; h_l / l = I - \text{гідравлічний ухил};$$

$$\sin \theta = i - \text{поздовжній ухил дна русла}$$

Одними з факторів, що обумовлюють пропускну здатність русла, є його стан і шорсткість. У роботі визначали гідравлічний параметр рівномірного потоку у відкритому руслі – коефіцієнт шорсткості для призматичного русла. *Шорсткість* – сукупна нерівномірність твердої поверхні, що позначається на виникненні сил тертя потоку на дно та стінки русла, яка залежить від абсолютного розміру нерівномірностей та їхнього взаємного розташування. Характеризуються величиною коефіцієнта шорсткості  $n$ .

Коефіцієнт шорсткості  $n$  входить в емпіричні формули для визначення коефіцієнта Шезі  $C$ . Останній, зі свого боку, входить в формулу Шезі, що є

основною розрахунковою залежністю рівномірного руху рідини у відкритих руслах:

$$Q = \omega C \sqrt{Ri}, \quad (4.1)$$

де  $Q$  – витрата води, м<sup>3</sup>/с;  
 $\omega$  – площа живого перетину потоку, м<sup>2</sup>;  
 $C$  – коефіцієнт Шезі, м<sup>0,5</sup>/с;  
 $R$  – гідравлічний радіус, що є відношенням площі живого перетину  $\omega$  до змочений периметру  $\chi$ , м, тобто:

$$R = \frac{\omega}{\chi}. \quad (4.2)$$

При розрахунках гідротехнічних споруд з використанням формули Шезі коефіцієнт  $C$  розраховують за різними емпіричними формулами:

– за формулою М. М. Павловського:

$$C = \frac{1}{n} R^y, \quad (4.3)$$

де  $n$  – коефіцієнт шорсткості, який визначається за довідковими даними;  
 $y$  – змінний показник ступеня  $y = f(n, R)$ :

$$y = 2,5\sqrt{n} - 0,13 - 0,75\sqrt{R}(\sqrt{n} - 0,1). \quad (4.4)$$

– за формулою Маннінга:

$$C = \frac{1}{n} R^{\frac{1}{6}}; \quad (4.5)$$

– за формулою І. І. Агроскіна:

$$C = \frac{1}{n} + 17,72 \lg R, \frac{M^{0,5}}{c} \quad (4.6)$$

Якщо геометричні параметри виражені в сантиметрах, то з формул (4.1), (4.5), (4.6) отримуємо формули для визначення коефіцієнта шорсткості:

$$n = \frac{4,64 \omega R^2 / \sqrt{i}}{Q} \quad \text{та} \quad n = \frac{1}{C - 17,72 \lg R}. \quad (4.7)$$

Коефіцієнт шорсткості  $n$  – це умовний коефіцієнт, який при даних розмірах і матеріалі русла, заданих витраті води  $Q$  й ухилі дна дає величину  $C$ , розраховану за формулою рівній дослідній величині.

Під час проектування відкритих каналів величину коефіцієнта шорсткості  $n$  вибирають за таблицями, які є в спеціальній літературі, який залежить від матеріалу стінок і дна русла, а також умов його утримання. Фактично ж величина коефіцієнта  $n$  залежить від великої кількості факторів (шорсткості, рослинності, руслоформувальних процесів – замулення та розмиву, перешкод, розмірів і форми каналу, глибини наповнення та витрати, завислих і донних насосів, сезонних змін, пов'язаних із ростом водної рослинності). Таблиці для  $n$  містять лише описові та якісні характеристики категорій русел.

### Склад роботи

1. Визначити за дослідними даними значення коефіцієнта шорсткості  $n$  відкритого каналу прямокутного перерізу.
2. Знайти величину коефіцієнта  $n$  для матеріалу стінок і дна каналу в довідковій літературі.
3. Обчислити відносні відхилення.

### Опис експериментальної установки

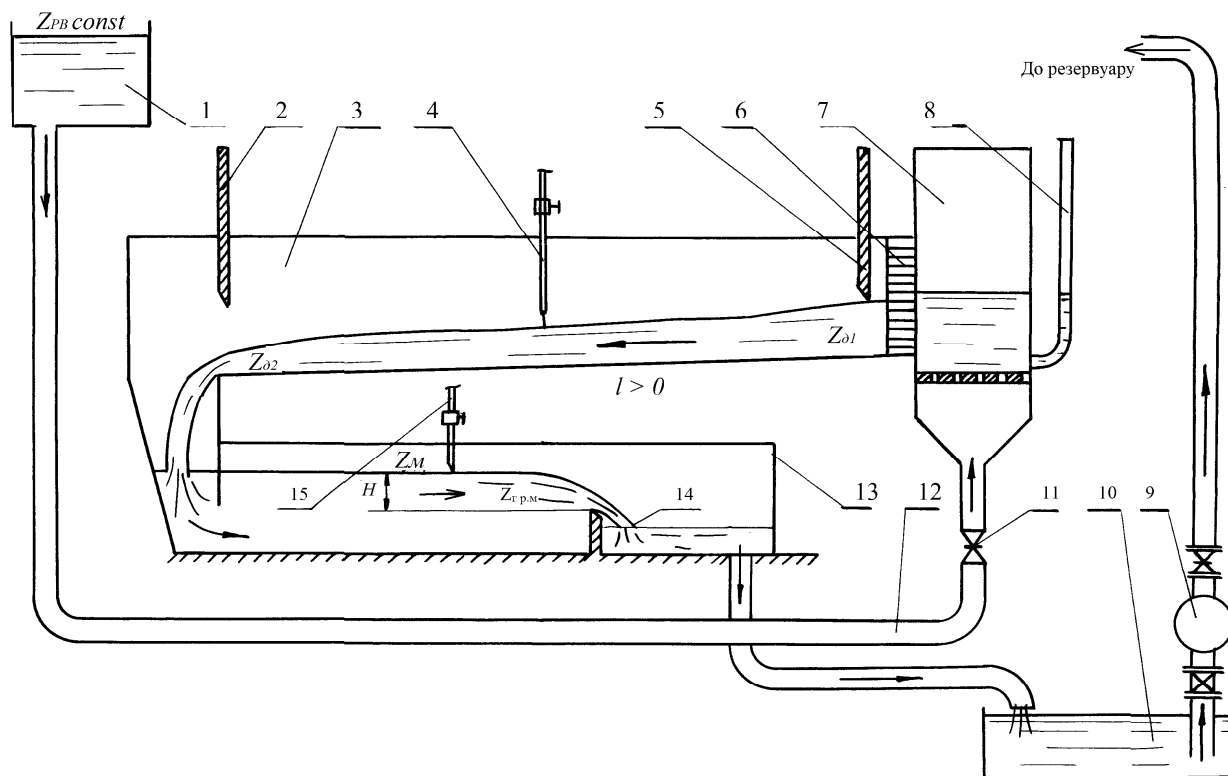
Для виконання роботи використовується скляний, досить довгий лоток, щоб у ньому можна було отримати ділянку з рівномірним рухом води.

Установка (рис. 4.2) включає в себе: скляний лоток (3) прямокутного перетину з прямим ухилом дна ( $i > 0$ ), обладнаний в головній і зливній частинах плоскими затворами (5) і (2) (для регулювання глибини потоку) і мірною голкою (4) (для вимірювання відміток дна та вільної поверхні потоку); головну частину (7), забезпечену струменевим випрямлячем (6), ґратчастим гасником (9) і п'єзометром (8), з'єднаним через трубопровід (12), на якому є засувка (11) для регулювання витрати води з напірним резервуаром (1). Нижній бак (13), забезпечений голкою (15) і трикутним водозливом (14) для вимірювання величини витрати  $Q$ . Установка входить в систему оборотного водопостачання лабораторії, що включає приймальний резервуар (10), відцентровий насос (на схемі не показаний) з системою трубопроводів і напірний резервуар (1).

### Порядок проведення роботи

1. Виміряти лінійкою ширину лотку  $b$ .
2. Виміряти позначки дна  $Z_{d1}$  і  $Z_{d2}$  у перетинах, розташованих у головній і зливній частинах каналу (3), і відстань (1) між ними (за шкалою).
3. Виміряти позначку гребеня трикутного водозливу (14)  $Z_{г}$  р.м.

7. Змінюючи витрату води засувкою, виконати аналогічні дослід та записати отримані дані до журналу.



- у відкритому призматичному руслі, зазвичай з прямим ухилом дна, вимірюють величини, необхідні для визначення: витрата води  $Q$ , площі живого перетину  $\omega$  і ухилу дна  $i$ ;
- за формулами обчислюють коефіцієнт Шезі  $C$  та величину  $n$ ;
- знайдені чисельні значення коефіцієнта шорсткості  $n$  порівнюють з даними в довідковій літературі. Вони є результатом обробки численних дослідних даних, отриманих різними дослідниками у різні роки в штучних і природних руслах у натурних і лабораторних умовах.

1. Визначаємо гідравлічні параметри потоку:

- площу живого перетину  $\omega$  потоку;
- $\omega = (b + mh)h$ ; змочений периметр  $\chi$ ;
- $\chi = b + 2h\sqrt{1 + m^2}$ ; гідравлічний радіус  $R$ .

2. Розраховують значення коефіцієнта Шезі  $C$  за формулами (4.3-4.6).

3. За довідковою літературою визначають теоретичне значення коефіцієнту шорсткості  $n$  за формулою для матеріалу лотка та дослідне  $n$ .

4. За даними розрахунку значення  $n$  зіставляють із дослідними й роблять висновок про можливість застосування залежностей (4.6, 4.8–4.9).

Таблиця 4.1 – Журнал лабораторної роботи № 4

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення		
		Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3
1	Відмітки дна каналу: у головній частині $Z_{\partial 1}$ , м зливній частині $Z_{\partial 2}$ , м			
2	Відстань між перерізами з відмітками $Z_{\partial 1}$ і $Z_{\partial 2}$ $L_{1-2}$ , м			
3	Ухил дна каналу $i = \frac{Z_{\partial 1} - Z_{\partial 2}}{L_{1-2}}$			
4	Мірний трикутний водозлив (водозлив Томсона): – відмітка гребня $Z_{г.р.м.}$ , м – відмітка рівня води $Z_m$ , м – напір на водозлив $H = Z_m + Z_{г.р.м.}$ , м			
5	Витрата води $Q = 1,4H^{5/2}$ , м <sup>3</sup> /с			
6	Відмітка вільної поверхні у заданому перерізі $Z$ , м			
7	Відмітка дна каналу $Z_{\partial}$ , м			
8	Глибина потоку $h_0 = Z - Z_{\partial}$ , м			
9	Ширина лотка (потоку), $b$ , м			
10	Площа живого перетину, $\omega = bh_0$ , м <sup>2</sup>			
11	Змочений периметр, $\chi = b + 2h_0$ , м			
12	Гідравлічний радіус, $R = \omega / \chi$ , м			
13	Коефіцієнт Шезі, $C = Q / \omega \sqrt{Ri}$ , м <sup>0,5</sup> /с			
14	Коефіцієнт шорсткості: $n_1 = R^y / C$ $n_2 = R^{1/6} / C$ $n_3 = 1 / C - 17,72 \lg R$ , за довідником $n_{емп}$			
15	Відносна похибка: $\Delta n_1 = ((n_{емп} - n_1) / n_{емп}) 100\%$ $\Delta n_2 = ((n_{емп} - n_2) / n_{емп}) 100\%$ $\Delta n_3 = ((n_{емп} - n_3) / n_{емп}) 100\%$			

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)

### **Контрольні запитання**

1. Поясніть умови рівномірного руху рідини у відкритому руслі.
2. Що таке коефіцієнт шорсткості  $n$  та які чинники впливають на його величину при проектуванні гідротехнічних споруд?
3. Опишіть формулу Шезі та поясніть її.

## Лабораторна робота № 5

### Вивчення форм та параметрів водозливів

#### Загальні відомості

Водозливом називають безнапірний отвір (виріз у стінці), через який протікає рідина. Ділянка потоку води, що прилягає до водозливу з верхнього боку, називається верхнім б'єфом, а з низового – нижнім б'єфом.

Класифікують водозливи за багатьма ознаками, зокрема за товщиною водозливної стінки (порогу) та її окресленням, розташуванням і формою стінки в плані, впливом рівня нижнього б'єфа на витікання, формою вирізу отвору у стінці, ступенем бокового стиснення струменя, що переливається через водозлив.

У роботі вивчається пропускна здатність мірних водозливів із тонкою стінкою.

Водозлив із тонкою стінкою – водозлив, товщина стінки  $\delta$  якого не впливає на форму переливального струменя та становить  $\delta \leq 0,67 H$  (де  $H$  – напір на водозливі) (рис. 5.1).

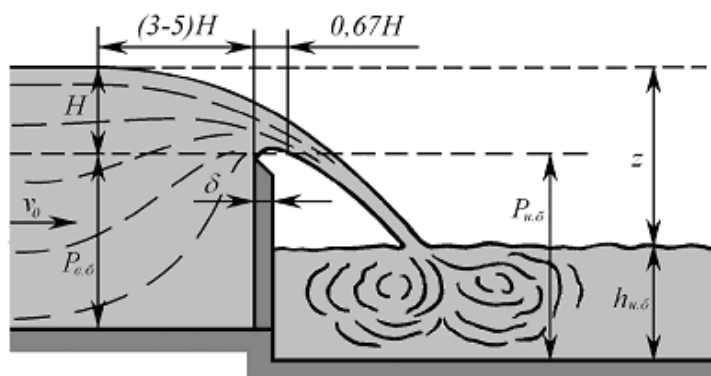


Рисунок 5.1 – Витікання через водозлив з тонкою стінкою (непідтопленний)

Водозливи з тонкою стінкою за формою вирізу отвору в стінці бувають: прямокутні, трикутні, трапецієподібні й криволінійні. Трикутні, прямокутні та трапецієподібні водозливи широко застосовуються для вимірювання витрат води на невеликих водотоках і в лабораторних умовах. Вони є мірними водозливами та забезпечують високу точність вимірювання (помилка 1 %).

Попередньо водозливи тарирують, пропускаючи крізь них різні витрати води  $Q$ , (вимірювані, наприклад, об'ємним способом) і визначають відповідні їм напори  $H$ .

У результаті тарування складають таблицю або будують графік  $Q = f(H)$  (рис. 5.2), якими й користуються для визначення величини витрат  $Q$  за виміряною величиною напору  $H$  на водозливі, не вдаючись до вимірювань об'єму води та часу.

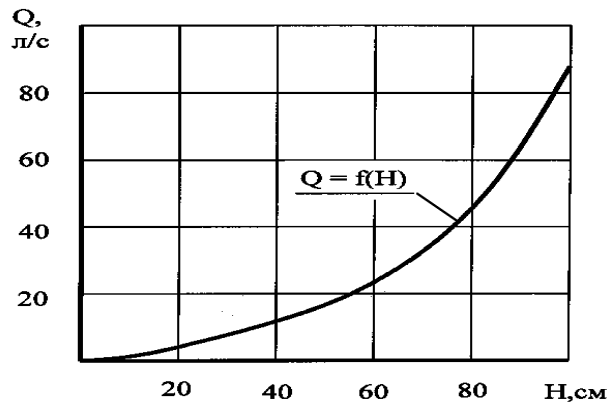


Рисунок 5.2 – Вигляд тарувальної кривої водозливу з тонкою стінкою

З точки зору впливу рівня нижнього б'єфа на пропускну здатність водозливів, вони можуть бути підтопленими і непідтопленими.

Непідтоплений водозлив – водозлив, при якому положення рівня нижнього б'єфа не впливає на пропускну здатність водозливу. Водозлив з тонкою стінкою стає підтопленим за умови виконання двох умов:

1) відмітка рівня нижнього б'єфа РНБ повинна бути більше рівня гребеня водозливу  $Z_{гр}$ . Перепад у споруді  $Z$  менше напору  $H$  або глибина підтоплення  $h_{п}$  більше нуля ( $h_{п} > 0$ );

2) сполучення падаючого з водозливу струменя з нижнім б'єфом має відбуватися при затопленому стрибку.

Одним з основних питань під час дослідження будь-якого водозливу є вивчення його пропускну здатності  $Q$ . У цій роботі вивчаються трикутний водозлив із кутом при вершині  $\theta = 90^\circ$  (водозлив Томсона) (рис. 5.3), і трапецієподібний водозлив при  $\varphi = 14^\circ$  (рис. 5.4).

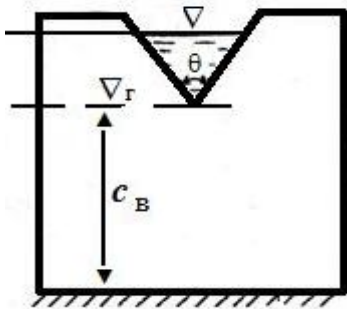


Рисунок 5.3 – Водозлив Томсона

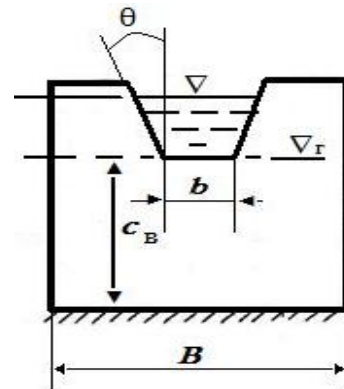


Рисунок 5.4 – Трапецієдальний водозлив із тонкою стінкою ( $\varphi=14^\circ$ )

Витрата через непідтоплений трикутний водозлив з вертикальною тонкою стінкою (при  $\theta = 90^\circ$ ) визначається за формулою Томсона:

$$Q = 1,4 H^{5/2}, \text{ м}^3/\text{с}. \quad (5.1)$$

Формула Томсона застосовується за умов:  $0,05 \leq H \leq 0,25$  м,  $V_0 \leq 0,5$  м/с.

Також витрата через трикутний водозлив визначається за формулою:



$$Q = 1,343 \cdot H^{2,47} . \quad (5.2)$$

При куті  $22^\circ \leq \theta \leq 118^\circ$  витрату визначають за формулою Граве:

$$Q = 1,331 \left( \operatorname{tg} \frac{\theta}{2} \right)^{0,996} \cdot H^{2,47} , \text{ м}^3/\text{с} . \quad (5.3)$$

Трикутні водозливи мають меншу пропускну спроможність, ніж прямокутні й трапецієподібні (при постійному напорі  $H$ ), їх застосовують для вимірювання невеликих витрат.

Витрата через прямокутний водозлив із тонкою стінкою:

$$Q = m_0 \cdot \sigma_n \cdot b_2 \sqrt{2g} \cdot H^{\frac{3}{2}} . \quad (5.4)$$

Витрата через непідтоплений трапецеїдальний водозлив при вільному витіканні та куті  $\varphi = 14^\circ$  (при  $b \geq 3H$ ) визначають за формулою:

$$Q = 1,86b H^{3/2} = kb H^{3/2} , \quad \text{м}^3/\text{с} , \quad (5.5)$$

де  $k = 1,86 \text{ м}^{1/2}/\text{с}$  – коефіцієнт пропорційності;  
 $b$  – ширина водозливного отвору знизу.

### Склад роботи

1. Визначити за дослідними даними для трикутного і трапецеїдального водозливів значення коефіцієнтів пропорційності  $m_{\text{досл}}$  і  $k_{\text{досл}}$  та порівняти зі значення у формулах (5.4) і (5.5).
2. Побудувати за дослідними даними тарувальні криві  $Q = f(H)$ .

### Опис експериментальної установки

Робота виконується на установці, схема якої зображена на рисунку 5.5. Трикутний і трапецієподібний водозливи розміщуються у скляному лотку (3). Витрата води, що пропускається через послідовно розташовані водозливи, регулюється засувками. Величина витрати вимірюється об'ємним способом.

Установка для проведення лабораторної роботи складається з гідравлічного лотка (3) змінного ухилу, баку (4) із мірним трикутним водозливом (5) та циркуляційного насосу (1) (рис. 5.5). Установка становить циркуляційну систему; витрата води в ній регулюється засувками до й після насосу. Водозлив з тонкою стінкою (2) виконаний у вигляді бетонних блоків та встановлюються в гідравлічний лоток у період проведення лабораторної роботи.

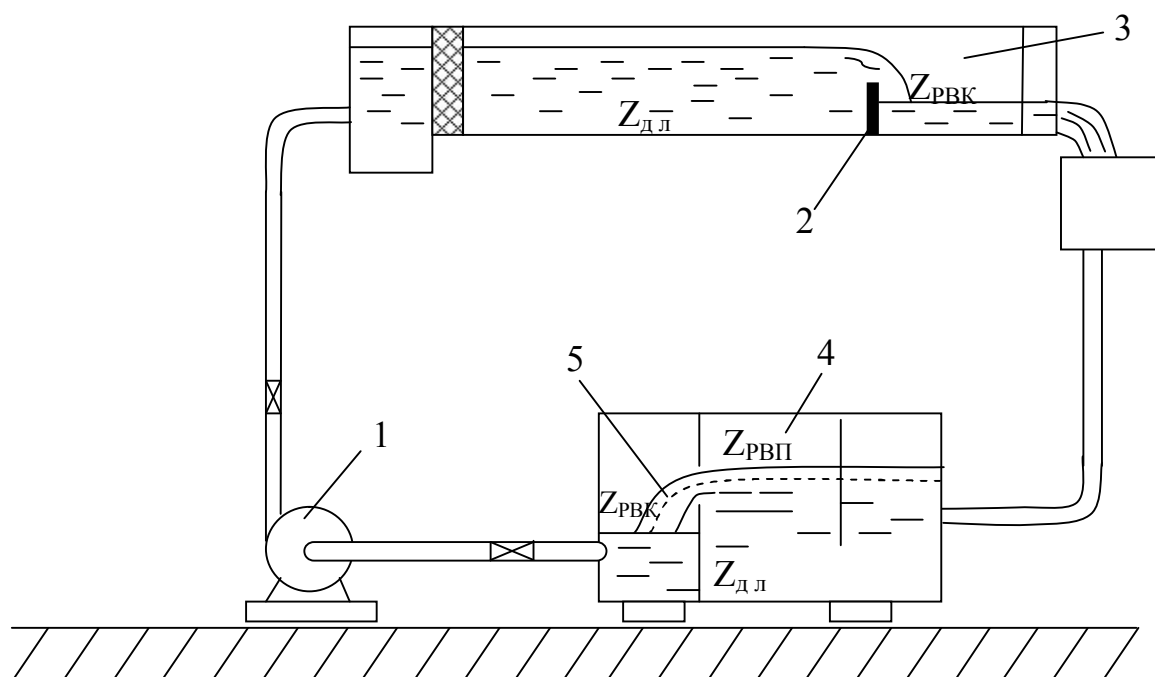


Рисунок 5.5 – Схема експериментальної установки з гідравлічним лотком

### Порядок проведення роботи та обробка експериментальних даних

1. Виміряти позначки: дна лотка, гребеня трикутного та трапецієподібного водозливів.
2. Виміряти ширину за низом  $b$  отвору трапецієподібного водозливу.
3. Відкрити (частково) засувку для пропуску деякої невеликої кількості води через водозливи.
4. Виміряти позначки рівнів води перед водозливами на відстані  $l \geq 3H$  від водозливної стінки.
5. Виміряти витрату води (за допомогою мірного баку (4) і секундоміра).
6. Обробити отримані дослідні дані та результати записати до журналу (табл. 5.1). За отриманими даними побудувати тарувальні криві для досліджуваних водозливів та зробити висновок за результатами роботи.

Таблиця 5.1 – Журнал лабораторної роботи № 5

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності	Числові значення	
		Трикутний водозлив	Трапецієподіб- ний водозлив
2	Відмітки: дна лотка, $Z_{д.л.}$ , м гребеня водозливу, $Z_{гр}$ , м рівня води перед водозливом, $Z_{рв}$ , м початкового рівня води у мірному баці, $Z_{рвп}$ , м кінцевого рівня води у мірному баці, $Z_{рвк}$ , м		

## Продовження таблиці 5.1

1	2	3	4
3	Об'єм води у мірному баці, $W$ , м <sup>3</sup>		
4	Час $t$ води на рівні з $Z_{РВП}$ до $Z_{РВК}$ , $t$ , с		
5	Витрата води $Q = \frac{W}{T}$ , м <sup>3</sup> /с		
6	Напір на водозливі $H = Z_n - Z_{гр\ n}$ , м		
7	Коефіцієнт пропорційності за емпіричними формулами: $m = \frac{8}{15} \mu \sqrt{2g}$ $k$		
8	Коефіцієнт пропорційності (дослідні значення) $m_{досл}$ і $k_{досл}$ , м <sup>1/2</sup> /с		
9	Похибка у відсотках, %		
10	Тарувальні криві для: <div style="display: flex; justify-content: space-around; align-items: center;"> <span>– трикутного водозливу</span> <span>– трапецієподібного водозливу</span> </div>		

« \_\_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 20\_\_ p.

(підпис студента)

## Контрольні запитання

1. Що таке водозлив? Чому можна уподібнити рух води через водозлив?
2. Що таке водозлив із тонкою стінкою? Наведіть його класифікацію.
3. Наведіть умови підтоплення водозливів з тонкою стінкою.
4. Напишіть формули для визначення витрати через водозлив Томсона й трапецієподібний (при  $\varphi = 14^\circ$ ).
5. Як виглядає тарувальна крива водозливу та для чого вона будується?

## Лабораторна робота №6

### Вивчення фільтраційних властивостей різних типів ґрунтів

#### Загальні відомості

*Фільтрацією* називають рух води в порах водонасиченого ґрунту. Знання закономірностей фільтрації застосовують для визначення припливу ґрунтових вод до котлованів споруджуваних будинків, дренажним і водозабірних пристроїв, для розрахунків осідання фундаментів і обчислення втрат води через земляні греблі й дамби. Рух ґрунтових вод, так само як у потоках відкритих і напірних, може бути сталим і несталим, рівномірним і нерівномірним, напірним і безнапірним, двовірним (плоским) і тривірним (просторовим).

Якщо рух ґрунтових вод відбувається з вільною поверхнею, на якій тиск дорівнює атмосферному, такий рух є *безнапірним*.

Якщо відбувається рух ґрунтових вод у повністю заповненому водоносному шарі, зверху й знизу обмеженому водонапірними шарами, і всі пори заповнені водою, тобто п'єзометрична лінія розташована вище верху водоносного шару, рух – *напірний*.

Об'єм води, що проходить через живий переріз пористого середовища в одиницю часу, називають *фільтраційною витратою*.

*Швидкість фільтрації* – відношення витрати до площини поперечного перерізу всього пористого середовища, через яке здійснюється фільтрація. Отже, швидкість фільтрації є фіктивною швидкістю руху, що відрізняється від дійсної швидкості, з якою переміщується вода в порах ґрунту. Режим руху ґрунтових вод може бути ламінарним і турбулентним.

Під час вивчення фільтраційних властивостей різних типів ґрунтів у роботі вивчається усталена напірна фільтрація в піщаному ґрунті на установці Дарсі при ламінарному русі, що описується законом Дарсі, при цьому швидкість фільтрації лінійно залежить від гідравлічного ухилу:

$$V_{\phi} = k I, \quad (6.1)$$

де  $k$  – коефіцієнт фільтрації.

Формула (6.1) називають *законом Дарсі* або *лінійним законом фільтрації*.

$$Q = \omega k I, \quad (6.2)$$

де  $V$  – швидкість фільтрації. Уведемо поняття *швидкості фільтрації*.

$$V_{\phi} = Q / \omega. \quad (6.3)$$

де  $Q$  – витрата, що проходить через переріз ґрунту, площею  $\omega$ .

$\omega$  - площа поверхневого перетину фільтраційного потоку, що складається з сумарної площі перетину пор ( $\omega_{пор}$ ) і частинок скелета ґрунту ( $\omega_{ск}$ ), тобто:  $\omega = \omega_{пор} + \omega_{ск}$ ;

$k$  – коефіцієнт фільтрації, що має розмірність зазвичай у см/с або м/добу, характеризує водопроникність ґрунту. Величину  $k$  визначають для кожного виду ґрунту дослідним шляхом (при постійній температурі фільтрувальної рідини).

У довідковій літературі величини коефіцієнта фільтрації ґрунтів зазвичай даються при температурі 10 °С. Для переходу від величини коефіцієнта  $k_t$ , отриманої при температурі  $t$ , відмінною від 10 °С, до величини при 10 °С застосовується формула:

$$k_{10} = \frac{k_t}{\tau}, \quad (6.4)$$

де  $\tau$  – температурна поправка, яка розраховується за формулою:

$$\tau = 0,7 + 0,03t, \quad ^\circ\text{C}. \quad (6.5)$$

Гradient напору  $I$  (відношення різниці повних напорів)  $H_1 - H_2 = h_{1-2}$  у двох точках ґрунтового потоку, які лежать на одній лінії потоку, до відстані між ними  $l_{1-2}$ , вимірюваній за лінією:

$$I_{1-2} = \frac{H_1 - H_2}{l_{1-2}} = \frac{h_{1-2}}{l_{1-2}}. \quad (6.6)$$

У разі фільтрації швидкісним напором нехтують, тому повний напір вважають рівним гідростатичному, тобто:

$$H = z + \frac{p}{\rho g}. \quad (6.7)$$

Закон Дарсі показує, що швидкість фільтрації пропорційна gradientу напору та втрати напору лінійно залежать від швидкості фільтрації. Зауважимо, що реальна швидкість руху рідини в порах ґрунту  $V_d$ :

$$V_d = \frac{Q}{\omega_{пор}}. \quad (6.8)$$

Швидкість  $V_d$  і  $V$  зв'язані між собою відношенням:

$$V_d = V/n, \quad (6.9)$$

де  $n = \omega_{пор}/\omega$  – пористість ґрунту.

## Склад роботи

1. Переконайтеся у справедливості закону Дарсі шляхом побудови в масштабі (за даними трьох дослідів) графіків залежності швидкості фільтрації від градієнта напору  $I$  (графіків для трьох видів піщаного ґрунту, що відрізняються розміром частинок (рис. 6.1).

2. Визначити за графіком для одного виду піщаного ґрунту (зазначеного викладачем) середню величину коефіцієнту фільтрації та вказати її на графіку (рис. 6.1).

3. Побудувати у масштабі за даними одного дослідів епюру напорів (графік зміни напору шляхом фільтрації (рис. 6.2).

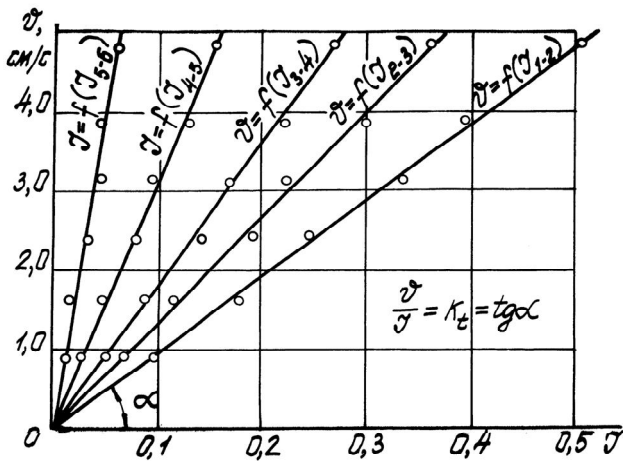


Рисунок 6.1 – Графік залежності швидкості фільтрації від градієнту напору  $I$

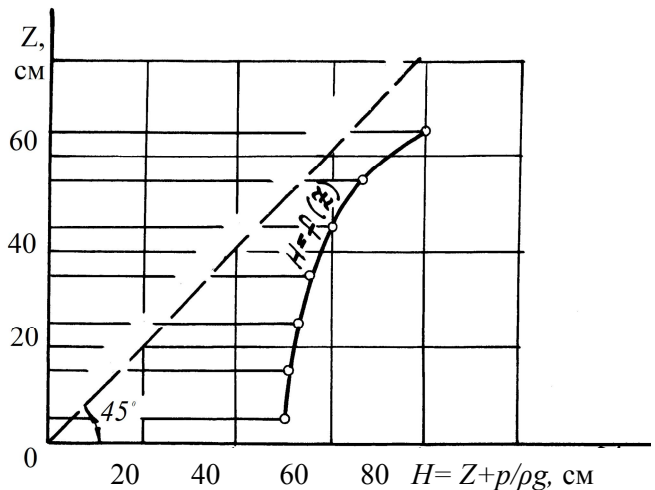


Рисунок 6.2 – Епюра напорів

## Опис експериментальної установки

При лабораторних випробуваннях для визначення коефіцієнтів фільтрації нев'язких ґрунтів використовують прилад Дарсі (рис. 6.3).

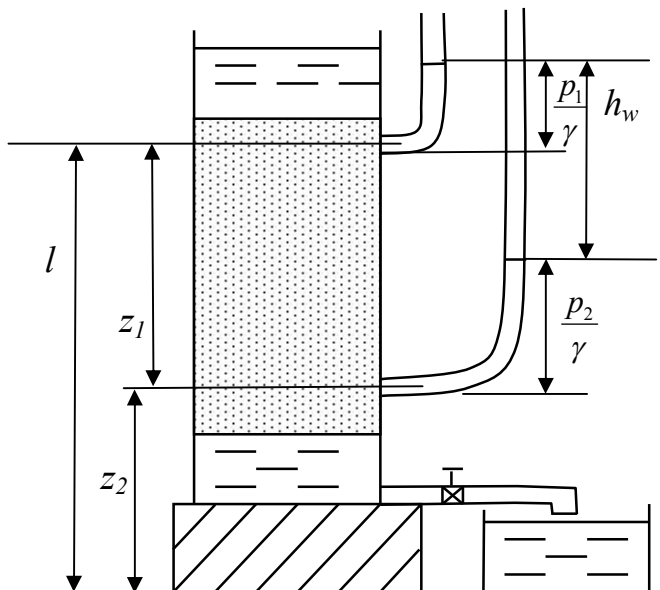


Рисунок 6.3 – Прилад Дарсі

У вертикальному відкритому циліндрі з площею поперечного перерізу  $w$  покладений пісок, що знизу підтримується сіткою. Вода надходить по трубці, сталість рівня підтримується завдяки зливу води через трубу (внизу приладу).

Вода, що фільтрується через ґрунт, збирається під решіткою на дні циліндра й витікає назовні через кран. Після того як рух стане сталим, знаходять витрату  $Q$  і вимірюють показання п'єзометрів, приєднаних до бічної стінки циліндра в межах частини обсягу, заповненого ґрунтом.

Час  $t$  заповнення профільованої води необхідного об'єму  $W$  заміряється секундоміром. Температура води  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$  – термометром.

### Порядок проведення роботи

1. При різних положеннях зливного пристрою провести досліди:
  - визначити позначки рівнів води в п'єзометрах фільтраційного потоку;
  - виміряти лінійкою перевищення цих точок над площиною порівняння;
  - виміряти в посудині обсяг води, профільований через ґрунт, тривалість наповнення обсягу  $t$  і температуру води  $t$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .
2. Опустити зливний пристрій на 5–10 см і, почекавши кілька хвилин, щоб режим фільтрації встановився, повторити.
3. Отримані дослідні дані занести до табл. 6.1.
4. Побудувати в масштабі за отриманими даними графік для різних видів ґрунту (рис. 6.1) та епюру напорів для одного з дослідів (рис. 6.2).
7. Зробити висновок за результатами роботи.

### Обробка експериментальних даних

За формулою (6.3) визначають швидкість фільтрації  $V_{\phi} = Q/\omega$ , гідравлічний ухил  $I = h_{mp}/l$  ( $h_{mp}$  – різниця показань у двох п'єзометрах на відстані  $l$  один від одного). За формулою (6.4) знаходимо коефіцієнт фільтрації  $k$ .

У деяких щільних ґрунтах (глини й важкі суглинки) фільтрація починається лише тоді, коли гідравлічний ухил (градієнт напору) перевищить початковий градієнт  $I_0$ , тоді використовують таку формулу:

$$V_{\phi} = -k \left( \frac{d}{dl} + I_0 \right) = k(I - I_0). \quad (6.10)$$

Для дуже щільних глин  $I_0 = 20\text{--}30$ .

Експериментально встановлено, що закон Дарсі при числах  $Re$ , що перевищують значення  $Re_{кр}$ , порушується. При  $Re < Re_{кр}$  зберігається лінійний закон фільтрації (ламінарна фільтрація). При  $Re > Re_{кр}$  (турбулентна фільтрація) залежності  $V_{\phi}$  та  $I$  інші. Для цих випадків експериментально визначено:

$$I = a + b. \quad (6.11)$$

$$\text{або} \quad V_{\phi} = c I, \quad (6.12)$$

де  $a$ ,  $b$ ,  $c$  – коефіцієнти, що отримані дослідним шляхом для конкретних випадків руху ґрунтових вод.

Якщо швидкості значні й можна знехтувати членом  $a$ , одержуємо формулу, що нагадує Шезі:

$$V_{\phi} = K_{кр} I. \quad (6.13)$$

Формулу (6.12) застосовують для тріщинуватих порід при  $n = 1-1,75$ .

Турбулентний режим руху води можливий при фільтрації у великих частинках, наприклад, при русі води в кам'яному насипі. За С. В. Ізбашем  $K_{турб}$  становитиме:

$$K_{турб} = (20 - \frac{14}{d}) m \cdot d_m, \quad (6.14)$$

де  $d_m$  – середній діаметр кулі рівновеликого каменю, см;  
 $m$  – поруватість кам'яного насипу.

Таблиця 6.1 – Журнал лабораторної роботи № 6

№ п/п	Назва характеристик, розрахункові формули, розмірності		Числові значення характеристик		
			Дослід 1	Дослід 2	Дослід 3
1	2		3	4	5
1	Напори (відмітки рівнів води у п'єзометрах)  $H_i = z_i + p_i/\rho g$	$H_1$ , см			
		$H_2$ , см			
		$H_3$ , см			
		$H_4$ , см			
		$H_5$ , см			
		$H_6$ , см			
2	Об'єм профільтрованої води, $W$ , см <sup>3</sup>				
3	Тривалість фільтрації, $t$ , с				
4	Перевищення точок підключення п'єзометрів над площиною порівняння (геометричні висоти) $Z_i$	$Z_1$ , см			
		$Z_2$ , см			
		$Z_3$ , см			
		$Z_4$ , см			
		$Z_5$ , см			
		$Z_6$ , см			
5	Температура води, $t$ , °C				



таблиці 6.1

1	2	3	4	5
6	Фільтраційна витрата, $Q=W/t$ , см <sup>3</sup> /с			
7	Швидкість фільтрації, $V_\phi = Q/\omega$ , см/с			
8	Втрати напору $h_{i-i+1} = H_i - H_{i+1}$	$h_{1-2}$ , см		
		$h_{2-3}$ , см		
		$h_{3-4}$ , см		
		$h_{4-5}$ , см		
		$h_{5-6}$ , см		
9	Гradient напору $I_{i-i+1} = h_{i-i+1}/l$	$J_{1-2}$		
		$J_{2-3}$		
		$J_{3-4}$		
		$J_{4-5}$		
		$J_{5-6}$		
10	Коефіцієнт фільтрації $k_{t_{i-i+1}} = V_\phi / I_{i-i+1}$	$k_{t1-2}$ , см/с		
		$k_{t2-3}$ , см/с		
		$k_{t3-4}$ , см/с		
		$k_{t4-5}$ , см/с		
		$k_{t5-6}$ , см/с		
11	Температурна поправка $\tau = 0,7 + 0,03 t$ , °C			
12	Коефіцієнт фільтрації при 10 °C $k_{10_{i-i+1}} = k_{t_{i-i+1}} / \tau$	$k_{101-2}$ , см/с		
		$k_{102-3}$ , см/с		
		$k_{103-4}$ , см/с		
		$k_{104-5}$ , см/с		
		$k_{105-6}$ , см/с		

«\_\_\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

\_\_\_\_\_  
(підпис студента)**Контрольні запитання**

1. Що таке фільтрація?
2. Яке рівняння називають законом Дарсі? Поясніть його.
3. Наведіть формулу визначення коефіцієнта фільтрації.
4. Наведіть схему приладу Дарсі.
5. Сформулюйте поняття градієнта напору та поясніть, як визначається його величина.
6. Зобразіть епюру напорів та поясніть її.
9. Від яких факторів залежить фільтраційна здатність ґрунту?

## 2 САМОСТІЙНА РОБОТА

### ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 1 РУХ РІДИНИ У ВІДКРИТИХ РУСЛАХ

#### Тема 1 Витікання рідини з отворів і насадків

Маленькі та великі отвори. Отвір у тонкій і товстій стінках. Досконале та недосконале стиснення потоку. Вільні й підтоплені отвори. Коефіцієнт стиснення. Витікання рідини з малих отворів при постійному напорі. Витікання рідини з великих отворів при постійному рівні рідини в резервуарі. Витікання рідини з отворів при змінному напорі. Витікання рідини через насадки. Види насадок. Середнє значення коефіцієнтів для найпоширеніших видів насадок. Сфера застосування різних насадок.

#### *Питання для самоперевірки*

1. Що таке інверсія?
2. Досконале та недосконале стиснення рідини.
3. Вільні, підтоплені й затоплені отвори.
4. Напишіть формулу визначення коефіцієнта стиснення струменя.
5. У чому полягає розходження між витратою при витіканні з отворів при постійному та змінному напорі?
6. Класифікація насадок.
7. Сфера застосування різних видів насадок.

#### Тема 2 Усталений рух рідини у відкритих руслах

Диференціальне рівняння сталого руху рідини, що плавно змінюється. Види усталеного руху рідини в призматичному відкритому руслі. Питома енергія потоку й перерізу. Критична глибина, спокійні й бурхливі потоки. Критичний ухил.

#### *Питання для самоперевірки*

1. Які русла належать до призматичних і непризматичних?
2. Напишіть диференціальне рівняння сталого руху рідини, що плавно змінюється, у відкритому руслі. Чим таке рівняння для непризматичного русла відрізняється від рівнянь для призматичного русла?
3. Як можна витлумачити параметр кінетичності з енергетичної точки зору?
4. Що таке питома енергія потоку й чим вона відрізняється від питомої енергії перерізу?
5. Як змінюється по довжині питома енергія перерізу й питома енергія потоку? Чи може питома енергія перерізу бути постійною за довжиною потоку?
6. У чому полягає трактування зміни питомої енергії перерізу з погляду співвідношення роботи сил опору і роботи сил тяжіння при русі рідини?
7. Які особливості питомої енергії перерізу і її змін по довжині в руслах з нульовим і зворотним ухилом.
8. Яка глибина русла називається критичною?
9. Як визначити критичну глибину в руслах прямокутного та трапецієподібного поперечних перерізів?
10. Як визначити критичну глибину в трикутному руслі?

11. Чому дорівнює  $h_{кр}$  у руслі з параболічним поперечним перерізом?
12. Критична глибина в сегментному руслі.
13. Що таке нормальна глибина та критичний ухил?

### **Тема 3 Рівномірний рух рідини у відкритих руслах**

Типи відкритих русел. Умови існування рівномірного руху. Рівняння рівномірного руху. Емпіричні формули для швидкісного множника (коефіцієнта Шезі) і швидкісної характеристики. Припустимо, що не розмивають і не замулюють середні за перерізом швидкості.

#### ***Питання для самоперевірки***

1. Які ознаки характеризуються рівномірним рухом у відкритому руслі?
2. Як враховується неоднорідна шорсткість по периметру русла при розрахунку коефіцієнта Шезі?
3. Які фактори впливають також на значення коефіцієнтів Шезі?
4. Що називається допустимою нерозмиваючою та замулюючою середньою швидкостями в руслі?
5. Що таке гідравлічна крупність наносів?
6. Що таке транспортувальна здатність потоку?
7. Як можна визначити замулюючу швидкість у відкритому потоці?
8. Які основні типи завдань розглядаються при розрахунку каналів?
9. Укажіть співвідношення між основними типовими елементами русла, що розраховується, і русла з гідравлічно найвигіднішим профілем?
10. Які характеристики живого перерізу каналу трапецієподібного, параболічного й сегментного перерізу гідравлічно найвигіднішого профілю?
11. Як розраховуються канали в завданнях різного типу?

### **Тема 4 Гідравлічно найвигідніший переріз каналів**

Гідравлічно найвигідніший переріз каналу. Визначення нормальної глибини потоку. Розрахунок русел трапецієподібного перерізу.

#### ***Питання для самоперевірки***

1. Приведіть формулу визначення максимального гідравлічного радіуса.
2. Дайте визначення нормальної глибини потоку.
3. Методи визначення нормальної глибини потоку.
4. Відносні характеристики живого перерізу потоку.

### **Тема 5 Нерівномірний рух у відкритих руслах**

Основні поняття й визначення. Питома енергія перерізів, критична глибина. Бурхливий і спокійний стан потоку, критичний ухил. Основне диференціальне рівняння сталого нерівномірного руху, що плавно змінюється для призматичних русел. Можливі випадки співвідношень між глибиною нерівномірного руху  $h_1$ , глибиною рівномірного руху  $h_0$  і критичною глибиною  $h_{кр}$ . Дослідження форм вільної поверхні потоку.

### ***Питання для самоперевірки***

1. Визначення нерівномірного руху у відкритих руслах.
2. Питома енергія потоку.
3. Бурхливий і спокійний стан потоку.
4. Величина критичного ухилу.
5. Можливі випадки співвідношень між глибиною нерівномірного руху  $h_1$ , глибиною рівномірного руху  $h_0$  і критичною глибиною  $h_k$ .
6. Що таке гідравлічний стрибок і крива підпору?

### **Тема 6 Водозливи. Їх класифікація**

Класифікація водозливів. Водозлив з тонкою стінкою. Коефіцієнт витрати водозливу. Водозлив практичного профілю. Розрахунок незатоплених і підтоплених водозливів практичного профілю.

### ***Питання для самоперевірки***

1. Дайте визначення водозливу.
2. Що таке статичний напір на водозливі?
3. Класифікація водозливів за типом стінок, через які переливається вода.
4. Класифікація водозливів за формою вирізу отвору в стінці.
5. Класифікація водозливів за формою в плані.
6. Класифікація водозливів за розташуванням стінок щодо осі потоку.
7. Класифікація водозливів за наявністю в них бічного стиснення.
8. Класифікація водозливів за типом сполучення струменя з низовою частиною потоку.
9. Формула витрати водозливу.
10. Формула витрати водозливу практичного профілю.

## **ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 2. СПОЛУЧЕННЯ Б'ЄФІВ**

### **Тема 7 Сполучення б'єфів**

Основні положення питання про сполучення б'єфів. Вирішення завдань про сполучення б'єфів. Гідравлічний стрибок. Сполучення глибини. Рівняння стрибкової функції. Формули сполучених глибин для прямокутних русел. Довжина стрибка. Форма стрибка. Гідравлічний стрибок як змішувач (гасник енергії).

### ***Питання для самоперевірки***

1. Від чого залежить характер сполучення потоку, який пройшов через гідротехнічну споруду, з потоком у нижньому б'єфі?
2. Яке рівняння використовується для рішення завдань про сполучення б'єфів?
3. Що таке гідравлічний стрибок?
4. Питома енергія гідравлічного стрибка.
5. Дайте визначення стрибкової функції.

## Тема 8 Гідравлічний стрибок

Сполучення глибини. Рівняння стрибкової функції. Формули сполучених глибин для прямокутних русел. Визначення довжини стрибка, форми гідравлічного стрибка. Гідравлічний стрибок як змішувач і гасник енергії.

### Питання для самоперевірки

1. Що таке гідравлічний стрибок та приклади його виникнення?
2. Як визначаються сполучені глибини гідравлічного стрибка та які існують види гідравлічного стрибка залежно від їх співвідношення?
3. Опишіть та поясніть рівняння прижової функції та сфера її використання.
4. Які основні задачі ставляться при розрахунку гідравлічного стрибка, наведіть відповідні формули для русел прямокутного поперечного перерізу?
5. Формули для визначення довжини стрибка М.М. Павловського.
6. Дайте визначення досконалого гідравлічного стрибка.
7. Гідравлічний стрибок як змішувач і гаситель енергії.

## ЗМІСТОВИЙ МОДУЛЬ 3. РУХ ҐРУНТОВИХ ВОД

### Тема 9 Види фільтрації. Основний закон фільтрації

Види фільтрації. Основний закон фільтрації. Коефіцієнт фільтрації. Приплив води до водозабірної галереї й до дренажних колодязів. Основи розрахунку дренажу.

### Питання для самоперевірки

1. Види води в ґрунтах.
2. Що таке фільтрація вод?
3. Безнапірний і напірний рух ґрунтових вод.
4. Дайте визначення пористості ґрунту.
5. Закон Дарсі. Що таке коефіцієнт фільтрації?
6. Поняття про водозбірну галерею.

Завданням на контрольну роботу передбачається складання відповідей на питання для самостійного вивчення, номера яких зазначені в методичних рекомендаціях.

Номер теми	Номер варіанта														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	1	2	3	4	5	6	7	-	-	-	-	-	-	-	-
2	6	12	9	7	-	11	13	1	2	3	4	-	8	10	5
3	5	-	9	-	8	-	10	-	11	6	7	1	2	3	4
4	-	4	-	-	-	3	-	1	-	-	-	2	-	-	-
5	-	-	-	4	1	2	-	5	-	-	-	-	6	-	3
6	6	-	-	-	7	-	1	2	3	4	5	-	-	-	-
7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	5	4	3	2
8	7	6	5	3	4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
9				1	2	3	4	-	-	5	-	-	-	6	-

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Chanson H. Hydraulics of open channel flow / H. Chanson. – Elsevier, 2004. – 1102 p.
2. Латышенков А. М. Гидравлика / А. М. Латышенков, В. Г. Лобачев. – М. : Гос. изд-во литературы по строительству и архитектуре, 1956. – 408 с.
3. Альтшуль А. Д. Гидравлика и аэродинамика / А. Д. Альтшуль, П. С. Шивотовский, П. П. Иванов. – М., 1987. – 414 с.
4. Большаков, В.А. Гидравлика. Общий курс / В.А. Большаков, В.Н. Попов. – Київ, 1989 – 214с.
5. Емцев Б. Т. Техническая гидромеханика / Б. Т. Емцов. – М. : 1987. – 440 с.
6. Константинов Ю. М. Гидравлика / Ю. М. Константинов. – Київ, 1988. – 398 с.
7. Sturm T. W. Open channel hydraulics / T. W. Sturm. – New York : McGraw-Hill, 2010.
8. Большаков В. А. : сборник задач по гидравлике / В. А. Большаков, Ю. М. Константинов, В. Н. Попов и др. – Киев : Высш. шк., 1979 – 290 с.
9. Альтшуль А. Д. Гидравлические сопротивления / А. Д. Альтшуль. – М. : Недра, 1982. – 224 с.
10. Константинов Н. М. Гидравлика, гидрология, гидрометрия : учебник для вузов : в 2 ч. / Н. М. Константинов, Н. Н. Петров, Л. И. Высоцкий.. М. : Высшая школа, 1987. Ч.1 –304 с. ; Ч. 2. – 431 с.
11. Павловский Н. Н. Гидравлический справочник / Н. Н. Павловский // Л. – М. : ОНТИ, НКТП, 1937. – 890 с.
12. Справочник по гидравлическим расчетам – под ред. П. Г. Киселева. – М. : Энергия, 1997. – 312 с.
13. Чертоусов М. Д. Гидравлика. Специальный курс / М. Д. Чертоусов. – М. – Л. : Госэнергоиздат, 1962. – 640 с.
14. Чоу В. Т. Гидравлика открытых каналов / В. Т. Чоу. – М. : Стройиздат, 1969. – 464 с.
15. Бровченко П. Н. Открытые русла: руководство к лабораторным работам / П. Н. Бровченко, С. Н. Редников. – Челябинск : Изд. центр ЮУрГУ, 2010. – 34 с.
16. Чугаев Р. Р. Гидравлика : учебник для вузов : в 2 кн. / Р. Р. Чугаев. – М. : Энергоатомиздат, 1991. – Кн.1. – 351 с.
17. Гідравліка та її використання в агропромисловому комплексі : підручник для студентів вищих навчальних закладів / В. А. Дідур та ін. – 2008. – 553 с.

18. Штеренлихт Д. В. Гидравлика / Д. В. Штеренлихт. – М. : Колос, 2006. – 656 с.
19. Левицький Б. Ф. Гідравліка. Загальний курс / Б. Ф. Левицький, Н.П. Левін. – Львів : Світ, 1994 – 264 с.
20. Bear J. Hydraulics of groundwater / J. Bear. – Courier Corporation, 2012.
21. Гідравліка і нагнітачі : навч. посібник / О. М. Грабовський, О. М. Щабієв. – К. : НМКВО, 1992. – 312 с.
22. Науменко І. І. Гідравліка : підручник / І. І. Науменко. – Рівне: НУВГП, 2005. – 475 с.
23. Foster G. R. A laboratory study of rill hydraulics: I. Velocity relationships / G. R. Foster, L. F. Huggins, L. D. Meyer // Transactions of the ASAE. – 1984. – Т. 27. – №. 3. – С. 790-796.
24. Тітов Ю. П., Інженерна гідравліка. Навчально-методичний посібник до практичних занять / Ю. П. Тітов, М. М. Яковенко. – Харків : ХНАМГ, 2005. – 91 с.
25. Яковенко М. М. Методичні вказівки до виконання лабор. робіт, розрахунково-графічного завдання та контрольних робіт з навчальної дисципліни «Інженерна гідравліка» (для студ. 3 курсу денної і заочної форм навчання напряму підготовки 6.060103 «Гідротехніка (Водні ресурси)») / уклад.: М. М. Яковенко, Т. О. Шевченко ; Харків. нац. акад. міськ. госп-ва. – Харків : ХНАМГ, 2010. – 63 с.

# *Виробниче-практичне видання*

Методичні рекомендації  
до виконання лабораторних робіт та самостійної роботи  
з навчальної дисципліни

## **«ІНЖЕНЕРНА ГІДРАВЛІКА»**

*(для студентів 2–3 курсів денної та заочної форм навчання  
спеціальності 192 – Будівництво та цивільна інженерія, спеціалізації  
(освітні програми) «Цивільна інженерія (Водопостачання та водовідведення)»,  
«Гідротехніка (Водні ресурси)»)*

Укладач **ГАЛКІНА** Олена Павлівна

Відповідальний за випуск *В. О. Ткачов*

Редактор *В.І. Шалда*

Комп'ютерне верстання *О. П. Галкіна*

План 2018, поз. 153 М

---

Підп. до друку 09.04.2019  
Друк на ризографі  
Зам. №

Формат 60x84/16  
Ум. друк. арк. 2  
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.  
Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 5328 від 11.04.2017.